

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
(PPGEC)**

Fernanda Carvalho Pirola

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE CONCRETO SECO
UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO
PARA PAVIMENTAÇÃO DE 50MPA**

Florianópolis

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
(PPGEC)**

Fernanda Carvalho Pirola

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE CONCRETO SECO
UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO
PARA PAVIMENTAÇÃO DE 50MPA**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa
Catarina, como requisito parcial
exigido pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil
(PPGEC) para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto
Prudêncio Jr.

Florianópolis

2011

Fernanda Carvalho Pirola

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE CONCRETO SECO
UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS DE CONCRETO
PARA PAVIMENTAÇÃO DE 50MPA**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Florianópolis, julho de 2011

Prof. Dr^a. Janaíde Cavalcante Rocha
Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.
Orientador

Prof. Dr. Antonio Domingues de Figueiredo
USP

Prof. Dr. Alexandre Lima de Oliveira
IFSC

Profa. Dr^a. Janaíde Cavalcante Rocha
ECV/ UFSC

Aos meus pais, Dílson e Claudete,
com amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me dar força e capacidade de ir buscar os meus objetivos. Viver é um presente único, um desafio constante de cada dia ser melhor.

Ao Prof. Prudêncio, por não ter sido somente um orientador deste trabalho, mas também um amigo sempre disposto a passar todo o seu conhecimento técnico e científico. Agradeço pela excelente orientação, paciência e dedicação demonstradas durante todos esses anos.

A minha família: meu pai Pirolla, minha mãe Claudete e ao meu querido irmão Leonardo, sem a presença e o constante apoio de vocês com certeza eu não teria chegado até aqui. Amo vocês. Em especial a você meu pai, pelo incentivo aos meus estudos, pelo esforço realizado para minha formação em Engenharia Civil, e principalmente, pelo exemplo de coragem, perseverança e caráter, que levarei comigo para sempre.

Aos amigos do GTEC, obrigada de coração pelo apoio em todos os momentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Pelos momentos de descontração que renovavam minhas energias mesmo quando a cabeça estava fervendo de preocupações e não aguentava mais rodar concretos, rsrsr. Juliano, Vivi, Cíntia, Luis, Alemão, Diego, Felipe, Rudiele, Ronaldo. Sentirei muita falta de cada um de vocês.

Agradecimento especial à amiga Gabriela Damo, com quem pude dividir minhas angústias e conquistas ao longo deste trabalho. Gabi, muito obrigada por tudo!

Agradeço ao querido Willow, sempre prestativo e disposto a ajudar no que eu precisasse.

Ao Leco, grande amigo por estar sempre contribuindo para que este trabalho se desenvolvesse cada vez melhor. Valeu compadre...

À Toniolo Pré-Moldados pela confiança em disponibilizar as instalações de sua fábrica para o desenvolvimento desta pesquisa, suporte este indispensável para a apresentação dos resultados desta dissertação.

Aos funcionários do LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil): Renato, Luiz e Roque pela ajuda, disponibilização das instalações e equipamentos para execução dos ensaios.

Em especial, a amiga Patrícia, pela ajuda constante, sempre disposta independente da situação.

Ao meu noivo Beto, um agradecimento especial por todo incentivo, apoio, carinho, paciência e compreensão que teve comigo em todos os momentos. Amo você.

Agradeço de forma carinhosa e especial a Mariana por ter acreditado em mim, mesmo quando eu mesma não acreditava, obrigada pelo incentivo, pelo ombro amigo e pelas sábias palavras.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, me ajudaram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A utilização de pavimentos com blocos pré-moldados de concreto de 50MPa vem crescendo nos últimos anos, fato este comprovado pelo aumento do número de fabricantes. Este aumento do consumo se deve a diversos fatores, entre eles: facilidade na execução deste pavimento, bom desempenho do mesmo frente ao uso, maior permeabilidade, grande variedade de cores e modelos, facilidade de manutenção e reciclagem. Porém, apesar desta crescente expansão, constata-se que ainda são poucas as fábricas que conseguem garantir as resistências características preconizadas pela norma NBR 9781 (ABNT, 1987) e poucos são os estudos realizados na área dos concretos “secos” utilizados na produção destas peças. Em função disso, o presente trabalho teve como objetivo principal estudar a influência de algumas variáveis do processo produtivo de PCP de 50MPa na resistência mecânica e energia de compactação destas peças. As variáveis analisadas foram: traço, teor de sólidos, teor de brita 0, umidade, tipo de areia grossa e teor de areia fina. Além disso, avaliou-se a relação entre os resultados de energia e resistência à compressão obtidos em laboratório (com corpos-de-prova 9x8cm) e os dos equipamentos de vibro-compressão. Os estudos mostraram que é possível a previsão de resistência à compressão das PCP, bem como de sua textura e energia demandadas para fabricação, através de corpos-de-prova cilíndricos de 9x8cm moldados por meio do soquete de compactação. Os resultados mostraram, ainda, que todas as variáveis estudadas influenciam significativamente na resistência a compressão e energia de compactação das PCP com nível de confiabilidade superior a 95%. A areia de britagem estudada de uma maneira geral, mostrou-se ineficiente para a fabricação de PCP de 50MPa, pois, além de não aumentar significativamente a resistência à compressão das peças, aumentou bastante a energia de compactação demandada. Também o controle da variável umidade mostrou-se de extrema importância para o alcance das propriedades desejadas. O entendimento destas influências permitiu conceber uma solução de produção de peças com menores custos, menor desgaste dos equipamentos e com o máximo de constância possível quanto a textura e resistência mecânica, mostrando que o controle destas variáveis torna-se fundamental para o alcance das exigências preconizadas por norma e para a obtenção de produtos mais homogêneos na produção de PCP com $F_{pk} = 50 \text{ MPa}$.

Palavras-chave: peças de concreto para pavimentação, concreto seco.

ABSTRACT

The use of pavements made from precast concrete blocks (pavers) of 50MPa has been growing in recent years, a fact borne out by the increase in the number of manufacturers. This increase in use is due to various factors, amongst them: ease of application, performance in use, greater permeability, large variety of colours and models, easy maintenance and recyclability. However, whilst there is large expansion, there continues to be few manufacturers who can guarantee the accepted and recommended resistance characteristics which conform to NBR 9781 (ABNT, 1987) and little research carried out in the area of 'dry' concrete used in the production of these pieces. In response to this, the main objective of this work is to study the influence of some varied production processes of PCP 50MPa regarding mechanical resistance and the energy required to compact these pieces. The parameters analysed were: mix proportions, solids content, quantity of crushed stone, humidity, type of coarse sand and quantity of fine sand. As well as this it evaluates the relationship between energy results and compressive strength obtained in the laboratory (using 9x8cm specimens as reference) and of vibro-compression equipment. The studies demonstrate that it is possible to predict the compressive strength of PCP, as well as its texture and energy required for manufacture, using cylindrical specimens of 9x8cm, moulded through a compaction hammer as reference. Moreover the studies showed that, all the parameters studied significantly influence the compressive strength and the compaction energy of PCP with a level of reliability higher than 95%. A general study of crushed stone demonstrated its inefficiency for the manufacture of PCP 50MPa, since although not significantly increasing the resistance to the compression of the specimens tested, it significantly increased the compacting energy required. The control of moisture content was also shown to be extremely important in achieving the desired properties. Understanding these influences, it was possible to arrive at a solution for production of pavers with less cost, less stress on equipment and with the maximum possible consistency regarding texture and mechanical resistance. It was also shown that the control of these parameters becomes fundamental to comply with market demands and standard requirements for achieving the most homogeneous products in the production of PCP with $F_{pk} = 50 \text{ MPa}$.

Keywords: pavers, dry concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c) para uma mesma proporção agregados/cimento (traço fixo).....	37
Figura 2: Layout de uma fábrica de PCP.	38
Figura 3: Silos de armazenamento de agregados para posterior proporcionamento.....	41
Figura 4: Misturadores de eixo vertical e horizontal	42
Figura 5: Principais partes de uma máquina vibro-prensa.	44
Figura 6: Corte longitudinal da gaveta.	45
Figura 7: Detalhes da gaveta (conjunto de agitadores).....	46
Figura 8: Detalhes da gaveta (Raspadores de forma e das sapatas).	46
Figura 9: Funcionamento da gaveta.	47
Figura 10: Detalhe das sapatas aquecidas de um equipamento de vibro-compressão.	48
Figura 11: Molde de uma vibro-prensa para produção de PCP.....	49
Figura 12: Tipos de vibração das vibro-prensas.	50
Figura 13: Sequência de funcionamento de uma máquina vibro-prensa	53
Figura 14: Coeficiente de variação da resistência a compressão em função do coeficiente de variação da massa específica no estado verde das PCP.	65
Figura 15: Avaliação empírica da umidade da mistura: na umidade ótima a mão fica levemente suja com a pasta de cimento.	66

Figura 16: Sequência de moldagem dos corpos-de-prova 9x8cm.....	69
Figura 17: Curvas de resistência à compressão dos corpos-de-prova 9x8cm por massa específica no estado verde para as diferentes proporções empregadas.....	71
Figura 18: Curvas granulométricas dos agregados utilizados.....	80
Figura 19: Aspecto da superfície do CP de acordo com ponto na curva de umidade.	82
Figura 20: Universo de combinações testadas nos corpos-de-prova....	85
Figura 21: Sequência de desmoldagem dos corpos-de-prova na prensa.	87
Figura 22: Posição das PCP na chapa.	90
Figura 23: Detalhe, quanto à umidade ideal, da lateral de uma PCP recém produzida.	92
Figura 24: Determinação do volume médio das PCP	94
Figura 25: Procedimento adotado para a lavagem da areia de britagem	96
Figura 26: Resistência e energia para misturas com traço 1:3,0.	102
Figura 27: Resistência e energia para misturas com traço 1:3,5.	102
Figura 28: Resistência e energia para misturas com traço 1:4,0.	103
Figura 29: Textura dos corpos-de-prova.	106
Figura 30: Resistência e energia (tempo de vibro-compressão) para misturas moldadas em fábrica.....	119
Figura 31: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 1.	120

Figura 32: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 2	121
Figura 33: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 3.	121
Figura 34: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 4	122
Figura 35: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 5.	122
Figura 36: Correlação entre as resistências obtidas em PCP e seus respectivos corpos de-prova com misturas de areia natural	127
Figura 37: Correlação entre as resistências obtidas em PCP e seus respectivos corpos-de-prova com misturas de areia de britagem.	127
Figura 38: Relação entre as energias obtidas em PCP e seus respectivos corpos-de-prova.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de fabricantes com selo de qualidade.	32
Tabela 2: Resistências à compressão especificadas pelas principais normas vigentes.	55
Tabela 3: Fatores de correção em função da altura das peças.	57
Tabela 4: Limites quanto à absorção das peças para pavimentação.....	58
Tabela 5: Efeito predominante do aditivo incorporador de ar na pasta de cimento.	63
Tabela 6: Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV ARI RS.	77
Tabela 7: Composição granulométrica e módulo de finura dos agregados utilizados.	79
Tabela 8: Massa específica e material pulverulento dos agregados utilizados.	79
Tabela 9: Resultados de resistência a compressão e energia de compactação dos corpos-de-prova.	81
Tabela 10: Traços empregados na produção dos PCP e suas respectivas séries de corpos-de-prova.	88
Tabela 11: Tempos médios de vibro-compressão na produção das PCP com as misturas estudadas	90
Tabela 12: Pesagem das PCP em diversas chapas para detecção do problema de variação massa das mesmas.....	91
Tabela 13: Resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova.....	99
Tabela 14: Resultados de textura dos corpos-de-prova.....	100

Tabela 15: Resultados de energia de compactação dos corpos-de-prova	101
Tabela 16: Valores médios de resistência à compressão e energia de compactação das misturas com areia natural e areia de britagem.....	103
Tabela 17: Legenda empregada nas tabelas ANOVA.....	107
Tabela 18: Resultados da ANOVA para valores de resistência (H x P x T)	107
Tabela 19: Resultados da ANOVA para valores de resistência (teorA x tipoA x H).....	108
Tabela 20: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x H x %sólidos).....	108
Tabela 21: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x teorA x tipoA).	108
Tabela 22: Resultados da ANOVA para valores de resistência (P x teorA x tipoA).	109
Tabela 23: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x %sólidos).....	109
Tabela 24: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x tipoA).	109
Tabela 25: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x tipoA x %sólidos).....	110
Tabela 26: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x teorA).	110
Tabela 27: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x teorA x %sólidos).....	110
Tabela 28: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x tipoA).	111

Tabela 29: Resultados da ANOVA para valores de resistência (TipoA x TeorA x % sólidos).....	111
Tabela 30: Valores médios de alfa (α) para as variáveis analisadas em relação à resistência à compressão.	112
Tabela 31: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x H x P)	113
Tabela 32: Resultados da ANOVA para valores de energia (H x TeorA x TipoA).	113
Tabela 33: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x H x %sólidos).	113
Tabela 34: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x TeorA x TipoA).....	114
Tabela 35: Resultados da ANOVA para valores de energia (P x TeorA x TipoA).....	114
Tabela 36: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x %sólidos).....	114
Tabela 37: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x tipoA).	115
Tabela 38: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x TipoA x %sólidos)	115
Tabela 39: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x teorA).	115
Tabela 40: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x TeorA x %sólidos)	116
Tabela 41: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x TipoA).....	116

Tabela 42: Resultados da ANOVA para valores de energia (%sólidos x teorA x tipoA).	116
Tabela 43: médios de significância (α) para as variáveis analisadas em relação à energia de compactação.	117
Tabela 44: Resultados de resistência, energia e textura das PCP moldadas em fábrica.	118
Tabela 45: Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP produzidas com as misturas avaliadas.	123
Tabela 46: Resultados de resistência e textura das PCP moldadas com areia de britagem.	124
Tabela 47: Volume de sólidos e sólidos+água das PCP com as misturas estudadas.	125
Tabela 48: Relação custos de insumos e produtividade no processo produtivo das PCP de 50Mpa.	130
Tabela A1: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P16 AN 20-80.	141
Tabela A2: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P16 AN 30-70.	141
Tabela A3: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P20 AN 20-80.	141
Tabela A4: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P20 AN 30-70.	142
Tabela A5: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P24 AN 20-80.	142
Tabela A6 : Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P24 AN 30-70.	142
Tabela A7: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P16 AA 20-80.	143

Tabela A8: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P16 AA 30-70	143
Tabela A9: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P20 AA 20-80	143
Tabela A10: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P20 AA 30-70	144
Tabela A11: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P24 AA 20-80	144
Tabela A12: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P24 AA 30-70	144
Tabela A13: Valores de resistência à compressão e energia de compactação	146
Tabela A14: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 1.	155
Tabela A15: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 2.	156
Tabela A16: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 3.	157
Tabela A17: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 4.	158
Tabela A18: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 5.	159
Tabela A19: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura lavada 4.	160
Tabela A20: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura lavada 5.	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil

PCP – peças de concreto para pavimentação

CPH Z – Cimento Portland composto com Pozolana

CPH – Cimento Portland Pozolânico

CPH ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CPH ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfato

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	25
SUMÁRIO	27
1.INTRODUÇÃO	31
1.1.OBJETIVOS	33
1.2.ESTRUTURA DO TRABALHO	34
2.CONCRETO UTILIZADO EM PCP	35
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DAS PCP	35
2.2 PROCESSO PRODUTIVO DAS PCP	37
2.2.1 Armazenamento de matérias-primas	39
2.2.2 Proporcionamento dos materiais	39
2.2.3 Mistura	41
2.2.4 Moldagem das PCP	42
2.4.5 Cura	54
2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DAS PCP	54
2.3.1 Resistência à compressão	54
2.3.2 Variação dimensional	57
2.3.3 Resistência à abrasão	57
2.3.4 Textura superficial	57
2.3.5 Absorção	58
3.MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE PCP	59
3.1 CIMENTO PORTLAND	59
3.2 AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS	60
3.3 ÁGUA	61
3.4 ADITIVOS	62
4.MÉTODO DE DOSAGEM	64
4.1 DEFINIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP	64
4.2 ESCOLHA E PROPORCIONAMENTO DOS AGREGADOS	65

4.3 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA	67
4.4 PRODUÇÃO DAS MISTURAS E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA	70
4.5 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DOSAGEM E TRAÇO A SER TESTADO EM FÁBRICA	71
5.PROGRAMA EXPERIMENTAL	72
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	72
5.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS	73
5.3 MATERIAIS EMPREGADOS	76
5.3.1 Cimento	76
5.3.2 Água	78
5.3.3 Aditivo	78
5.3.4 Agregados	78
5.4 METODOLOGIA	80
5.4.1 Estudo em laboratório	80
5.4.2 Estudo em fábrica	88
6.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	98
6.1 ESTUDO EM LABORATÓRIO	98
6.1.1 Resistência à compressão, textura e energia	98
6.1.2 Testes estatísticos	106
6.2 ESTUDO EM FÁBRICA	118
6.3 RELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA E DAS PCP	126
6.4 RELAÇÃO CUSTO/RESISTÊNCIA COMPRESSÃO/ PRODUTIVIDADE	129
7.CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	131
8.REFERÊNCIAS	135
9.ANEXOS	139
ANEXO I	140
ANEXO II	145
ANEXO III	154
ANEXO IV	162

1. INTRODUÇÃO

A utilização de pavimentos com blocos pré-moldados de concreto (PCP) vem crescendo em todo o mundo. O uso destas peças tem se transformado, nos últimos anos, em uma alternativa cada vez mais viável de pavimentação (MEDEIROS, 1993). As principais vantagens no emprego das mesmas consistem:

- facilidade de execução. O pavimento intertravado não requer equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada para sua execução;
- liberação imediata ao tráfego, ou seja, pode ser colocado em serviço imediatamente após sua execução;
- capacidade de drenagem;
- sinalização incorporada ao pavimento. As PCP podem ser produzidas em diversos formatos e cores, servindo como sinalização horizontal no pavimento;
- efeito estético também devido à diversidade de formas e cores;
- baixo custo devido à fabricação industrializada;
- facilidade de manutenção, reutilização e reciclagem.
- resistência e durabilidade, quando projetado e executado corretamente. (BT ABCP, 1993).

Este sistema de pavimentação surgiu na Europa do pós-guerra e foi introduzido no Brasil na década de 1970. Desde então, este tipo de revestimento vem sendo empregado em diversos locais tais como: postos de gasolina, terminais de ônibus, estacionamentos, áreas industriais, vias urbanas, aeroportos e portos.

As peças de 50 MPa de resistência à compressão vêm sendo cada vez mais largamente usadas em portos, aeroportos, sendo empregadas até em rodovias. Segundo Madrid, (2004), diversos países como: Nicarágua, Costa Rica, Colômbia e Brasil têm utilizado PCP em estradas. Além disso, países em desenvolvimento como o Brasil têm ampliado sua rede portuária e, com isso, empregado grande quantidade de PCP de 50MPa, como é o caso da pavimentação do Ecopátio, pátio localizado a 12Km do porto de Santos (principal porto do país) que funciona como principal ponto de apoio, triagem e liberação de caminhões que se dirigem para o porto. Somente nesta obra, foram empregados 400mil m² de PCP de 50MPa. O uso do pavimento intertravado, nestes casos, é vantajoso, pois, além de todos os benefícios acima citados, traz, também, vantagens ambientais sendo considerada uma alternativa mais ecológica. Segundo Hallack (1998), as peças pré-

moldadas de concreto têm se firmado como uma forma bem sucedida de revestir áreas portuárias e terminais de carga. São duráveis e rígidas como as placas de concreto, tendo, ao mesmo tempo, a flexibilidade associada aos pavimentos asfálticos. São pequenas e espessas de maneira que não ocorrem trincas por tração na flexão. Uma vez que a superfície do pavimento possui uma rede de juntas, pode acomodar grandes deformações, sem danos. Em caso de recalques, as peças podem ser retiradas e recolocadas em período curto de tempo. Uma vez intertravadas, as peças formam uma superfície homogênea, resistente e contínua. Sendo feitas de concreto de alta qualidade, suportam as cargas estáticas pontuais sem apresentarem danos.

Devido a estas vantagens e a utilização cada vez em maior escala destas peças, houve, nos últimos anos, um aumento significativo da demanda por PCP de 50 MPa.

Neste cenário, constata-se também um aumento de indústrias que fabricam este tipo de pavimento. No entanto, apesar do aumento do consumo e do número de fabricantes, segundo Oliveira (2004), poucas são as fábricas que conseguem garantir as resistências características preconizadas pela norma NBR 9781 (ABNT, 1987). Isso é facilmente constatado pelo número de empresas no Brasil que, atualmente, possuem o selo de qualidade para as referidas peças, conforme mostra a Tabela 1 (38 fábricas com selo de 35 MPa e 12 fábricas com o selo de 50 MPa - ABCP, 2011).

Tabela 1: Número de fabricantes com selo de qualidade.

Região	Paver 35MPa	Paver 50MPa
Sul	16	6
Sudeste	17	6
Centro- Oeste	2	0
Norte	0	0
Nordeste	3	0
TOTAL	38	12

Fonte: Site ABCP (2011)

As causas da falta de qualidade na produção das peças são devidas a diversos fatores. Dentre eles, pode-se citar: falta de controle no processo produtivo, além de falta de conhecimento sobre o assunto. Segundo Rodrigues (1984), poucos são os dados e trabalhos realizados

sobre a tecnologia de concreto para fabricação de PCP. Fato este comprovado diante da pesquisa realizada para este trabalho. Quando se trata de concreto seco, muitas são as pesquisas que tratam de substituições de agregados por resíduos, de dimensionamento de pavimento, porém, pouca coisa tem sido feita a respeito do processo produtivo destas peças.

Diante deste panorama, para que se possa atender à necessidade de produção de PCP cada vez mais resistentes, com menor consumo de cimento, com maior homogeneidade para atender a um mercado cada vez mais competitivo, há a exigência de uma reavaliação constante das propriedades e características impostas a estas peças. No Brasil, as fábricas de PCP diferem muito em termos de controle de qualidade e sofisticação de seus equipamentos. Isso faz com que, em condições tão diversas, as PCP produzidas apresentem propriedades bastante heterogêneas (MEDEIROS, 1993). Variações na qualidade dos pisos intertravados, mesmo quando produzidos no mesmo equipamento, são decorrentes de variações no processo de proporcionamento das matérias-primas, mistura, cura, estocagem e transporte entre outros. (HOLDERCIM, 2000). Portanto, a análise destas importantes variáveis do processo como: análise dos agregados, dos aditivos, do tipo de equipamento, grau de compacidade, sistema de cura, entre outros é de fundamental importância.

Diante do exposto, a proposta deste trabalho é a de realizar estudos em concretos “secos” destinados à fabricação de PCP buscando contribuir para o melhor entendimento da influência do traço, do grau de compacidade, do tipo de equipamento, da composição de agregados nas propriedades deste concreto. Serão propostas otimizações que podem reduzir o custo e garantir uma produção eficiente nas fábricas. Com isso, será possível se alcançar peças cada vez mais resistentes e econômicas.

OBJETIVOS

Geral

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação da influência de alguns parâmetros de produção no desempenho das PCP de 50MPa. Para isso, foram equacionadas as diversas variáveis envolvidas no processo produtivo destas peças, ou seja, foram estudados os fatores influentes na dosagem e produção das mesmas, a fim de viabilizar uma solução com menores custos, menor desgaste dos equipamentos e com o máximo de constância possível nas características das peças.

Específicos

De forma mais específica, os seguintes objetivos foram definidos:

- Conhecer a caracterização dos agregados utilizados atualmente por empresa fabricante de PCP de 50MPa da Grande Florianópolis;
- Avaliar o efeito, nas propriedades do concreto, de substituições de agregados;
- Estudar o efeito da umidade nas propriedades do concreto “seco” utilizado na fabricação de PCP;
- Analisar a relação entre os resultados de energia e resistência à compressão obtidos em laboratório e os dos equipamentos de vibro-compressão, a fim de viabilizar estudos mais racionais, sem a necessidade de interferências constantes no processo produtivo das fábricas.

ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, o primeiro capítulo apresenta a introdução, em que são apresentados a justificativa da pesquisa, os objetivos e estrutura do trabalho.

Nos capítulos 2, 3 e 4, descreve-se a fundamentação teórica básica para o desenvolvimento do trabalho, onde foi feita uma comparação entre as propriedades dos concretos secos e plásticos, critérios exigidos para a produção de PCP com qualidade, bem como a descrição e caracterização dos materiais empregados, além de uma revisão sobre o processo produtivo das PCP e método de dosagem.

O capítulo 5 descreve o programa experimental, detalhando os equipamentos utilizados e os ensaios realizados, bem como os materiais empregados.

Já no capítulo 6, são apresentados e analisados os resultados obtidos no estudo e, por fim, no capítulo 7, são apresentadas as considerações finais e as recomendações para estudos complementares ao trabalho realizado.

2. CONCRETO UTILIZADO EM PCP

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS EMPREGADOS NA PRODUÇÃO DAS PCP

O concreto é um material composto, que consiste, essencialmente, de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o meio aglomerante é formado por uma mistura de cimento e água (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os concretos que possuem como aglomerante o cimento Portland, têm inúmeras aplicações e finalidades. Dentre eles, pode-se citar: os concretos plásticos e os concretos “secos”. Como exemplo de concretos plásticos, pode-se citar o convencional utilizado em obras de concreto armado, o concreto graute, etc. Já o concreto “seco” é empregado na produção de PCP, blocos de alvenaria estrutural, tubos, concreto compactado a rolo, entre outros.

Existem diversas diferenças que distinguem estes grupos de concreto como: a forma como o ar aprisionado às misturas é removido, a trabalhabilidade e o abatimento, a granulometria final, a relação água/materiais secos (H), os processos de produção entre outras.

Os concretos plásticos caracterizam-se pelo elevado consumo de água, além da quantidade necessária à hidratação do cimento, para obtenção de uma mistura plástica e com consistência conveniente, capaz de ser perfeitamente adensada. Essa característica permite que esses concretos sejam aplicados com certa facilidade, sendo que a retirada do ar aprisionado às misturas é feita mediante equipamentos simples, tais como vibradores de imersão (OLIVEIRA, 2004).

A água excedente utilizada para proporcionar a consistência desejada ao concreto, além da necessária a hidratação do cimento, dá origem a poros que fazem diminuir a resistência do concreto. A relação entre a resistência do concreto e a relação água/cimento (a/c) foi estabelecida por Duff Abrams em 1919 e é conhecida como Lei de Abrams (FRASSON, 2000).

Lei Abrams: A resistência do concreto é inversamente proporcional à relação água/cimento (a/c).

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}.$$

Onde: k_1 e k_2 são constantes empíricas obtidas através de ensaios em condições predeterminadas;

a/c relação água/cimento do concreto;

f_{cj} resistência do concreto na idade j dias.

Além da lei de Abrams, os concretos plásticos atendem a “Lei de Lyse” que estabelece que a quantidade de água a ser empregada em um concreto com um determinado grupo de materiais, para obter uma dada trabalhabilidade, independe do traço deste concreto. Na prática, para um dado grupo de materiais, existe uma relação água/materiais secos (H) constante para obter-se uma dada trabalhabilidade (FRASSON, 2000).

Os concretos secos apresentam consistência significativamente superior a dos concretos plásticos, devido à menor quantidade de água empregada, em função da necessidade de desforma imediata (MARCHAND, 1996). Essa característica, em particular, o torna um concreto levemente umedecido, sendo necessário o emprego de equipamentos especiais para a compactação (JUVAS, 1993). No caso das PCP, são utilizadas as chamadas vibro-prensas, que são equipamentos capazes de vibrar e comprimir, simultaneamente, a fim de eliminar os vazios da mistura e moldar as peças.

Diferentemente dos concretos plásticos, os concretos secos para a produção de PCP não seguem a risca a “lei de Abrams”, com sua conhecida relação água/cimento e sua influência na resistência à compressão (Figura 1). Na produção de PCP, via de regra, quanto maior a quantidade de água empregada na mistura, melhor será a resistência mecânica final das peças. Isto ocorre, pois a água empregada atribui uma melhor plasticidade à mistura, ou seja, a água funciona como “lubrificante”, diminuindo o atrito interno entre os grãos, tornando, assim, mais fácil a prensagem das peças pelas máquinas vibro-prensas e, conseqüentemente, mais eficiente a remoção dos vazios. Além disso, o aumento da quantidade de água aumenta o volume de pasta de cimento, melhorando a resistência à compressão até o ponto onde a qualidade da pasta passa a comandar a resistência das peças (a mistura passa a trabalhar como concreto plástico). Para Tango (1994), a quantidade de água de cada mistura deve ser a maior possível, desde que não faça com que as PCP tenham dificuldades de desforma por aderência aos moldes, ou por perda do formato adequado.

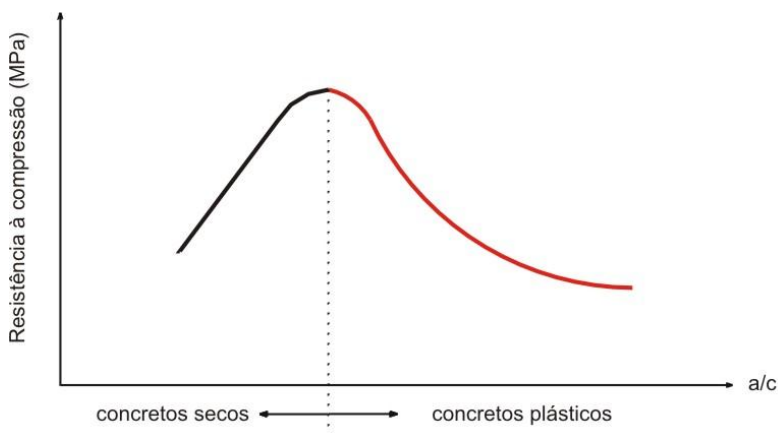


Figura 1: Resistência à compressão em função da relação água/cimento (a/c) para uma mesma proporção agregados/cimento (traço fixo).

Existe uma umidade ótima, na qual as misturas conseguem alcançar uma maior compactação, ou seja, um menor volume de vazios e, consequentemente, uma maior resistência.

Para concretos secos essa umidade é menor que a dos concretos plásticos e gira em torno de 6% a 8%.

No concreto seco, as propriedades no estado endurecido estão intimamente ligadas as do estado fresco, de forma muito mais pronunciada do que no concreto plástico (RODRIGUES, 1984). O concreto seco deve apresentar trabalhabilidade adequada a ser moldado com o equipamento disponível, além de demandar uma elevada coesão para que as peças mantenham-se inalteradas após a desforma. Para PCP, as principais propriedades requeridas no estado endurecido são: resistência à compressão, textura superficial da peça, que está relacionada com a composição granulométrica da mistura, e durabilidade, sendo esta última normalmente avaliada pela resistência à abrasão. Estas propriedades estão ligadas, além dos materiais empregados, com o tipo e regulagem dos equipamentos utilizados.

2.2 PROCESSO PRODUTIVO DAS PCP

A produção de PCP exige equipamentos e controle no processo produtivo bastante apurados para que seja viável fabricar produtos com

qualidade, economia e homogeneidade em suas características como resistência à compressão, textura, variações dimensionais, entre outros.

Para um melhor entendimento do processo produtivo das PCP, está apresentado na Figura 2 um *layout* de uma fábrica de peças de concreto para pavimentação, com seus respectivos equipamentos.

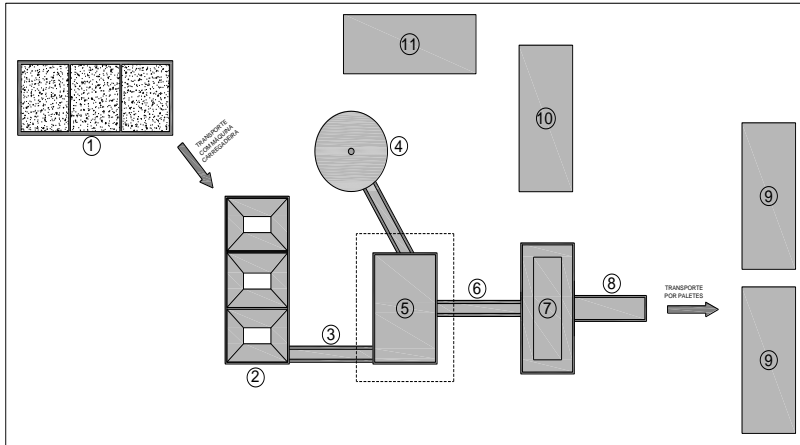


Figura 2: Layout de uma fábrica de PCP.

1. Baías de agregados;
2. Silo/ balança de agregados;
3. Correia transportadora;
4. Silo de cimento;
5. Misturador;
6. Correia transportadora;
7. Máquina vibro-prensa;
8. Transportador de chapas;
9. Câmaras de cura;
10. Paletização;
11. Laboratório.

As etapas envolvidas neste processo produtivo são:

- Armazenamento de matérias primas;
- Proporcionamento dos materiais;
- Mistura
- Moldagem das PCP (vibro-prensagem);
- Cura das peças.

A seguir, são descritas cada uma destas etapas, dando ênfase à moldagem das peças, pois esta é a etapa que exerce maior influência nas propriedades finais das PCP.

2.2.1 Armazenamento de matérias-primas

A armazenagem dos materiais destinados à produção de PCP deve ser a mais racional possível, de maneira que todos os percursos entre as baias e os silos sejam minimizados e não interfiram uns com os outros.

Os agregados devem ser estocados em locais protegidos da chuva, para evitar variações bruscas no teor de umidade. Além disso, deve-se armazená-los em baias com separação para que não haja contaminação entre diferentes tipos de materiais e, ainda, entre o agregado e o solo.

O cimento usado na fabricação das PCP pode ser estocado de duas formas: a granel ou em sacos. Em ambos os casos, o cimento deve ser estocado de forma a facilitar sua dosagem gravimétrica, nunca volumétrica, mesmo que a dosagem dos agregados seja em volume.

2.2.2 Proporcionamento dos materiais

A dosagem de um concreto “seco” visa obter uma mistura com um mínimo de vazios possíveis, ou seja, alcançar maior massa de material em um mesmo volume. A busca pelo menor número de vazios deve-se ao fato da relação direta entre a compactidade do concreto e sua resistência à compressão. Portanto, quanto mais compacta a peça, mais resistente ela será. Uma dosagem racional deve levar em conta os seguintes parâmetros:

- Determinação da melhor composição granulométrica para a mistura dos agregados e suas proporções ideais;
- Determinação da quantidade de água adequada a ser empregada na mistura. A quantidade ótima é aquela que proporciona maior compactidade as peças;
- Determinação da quantidade ideal de cimento. A escolha dessa proporção é função, principalmente, da resistência desejada e varia com o tipo de equipamento empregado.

Um método utilizado com sucesso em diversas fábricas do sul do Brasil é o descrito por Prudêncio, Oliveira e Frasson (2008). Este método de dosagem é proposto para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural.

Para que esta metodologia seja aplicada também em PCP, são necessários alguns ajustes, principalmente em relação aos agregados miúdos, traços empregados e correlação entre as resistências dos corpos-de-prova e das peças produzidas nas máquinas de vibro-compressão. Maiores detalhes sobre este método de dosagem serão apresentados no capítulo 4, a seguir.

Uma vez definida a dosagem do concreto, deve ser feito o seu proporcionamento, que pode ser volumétrico ou gravimétrico, sendo recomendável que os agregados e o cimento sejam dosados em massa, através de balanças. Uma das razões desta recomendação se deve ao inchamento da areia úmida que pode ocasionar erros nas medições. Além disso, quando o cimento e os agregados são dosados em massa, proporcionam um melhor controle sobre o processo, gerando uma maior qualidade e homogeneidade das peças produzidas. Já a água deve ser adicionada em volume através de dispositivos que corrijam a umidade do concreto. Os sensores são importantes na homogeneidade do material, principalmente quanto à sua resistência à compressão, uma vez que a umidade interfere na alimentação das formas. Os sensores de umidade devem ser acoplados tanto nos misturadores como nos sistemas de abastecimento dos agregados, permitindo que se obtenha uma correta proporção de água, diminuindo, desta forma, a variabilidade da resistência, em um mesmo lote de peças (FRASSON, 2000). A Figura 3 ilustra os silos de agregados de onde saem os materiais que serão, posteriormente, pesados para a confecção do concreto.



Figura 3: Silos de armazenamento de agregados para posterior proporcionamento.

2.2.3 Mistura

Depois de feito o proporcionamento do concreto, este deve ser levado ao misturador, a fim de que os materiais constituintes sejam misturados adequadamente de modo a produzir um concreto fresco, no qual todas as partículas dos agregados sejam revestidas com pasta de cimento, tornando-se, assim, uma mistura homogênea (NEVILLE, 1997).

A mistura para produção de PCP pode ser feita por misturadores de eixo vertical (misturadores forçados) ou horizontal (forçados e por gravidade). A quantidade e o tempo de permanência do material dentro do misturador variam de acordo com o tipo de equipamento e seu tamanho, devendo seguir as orientações do fabricante. A resistência média do concreto aumenta com o aumento do tempo da mistura. A velocidade de crescimento da resistência à compressão diminui rapidamente após cerca de um minuto e não é significativa após dois minutos. No entanto, dentro do primeiro minuto, a influência do tempo de mistura é consideravelmente importante (NEVILLE, 1997).

É importante adequar a capacidade do misturador ao ciclo de produção da máquina vibro-prensa, pois um processo ineficiente de mistura pode acarretar em má homogeneização do material, gerando heterogeneidade do produto final. Na Figura 4 são apresentados modelos de misturadores utilizados em fábricas de PCP da região Sul.



Figura 4: Misturadores de eixo vertical e horizontal.

2.2.4 Moldagem das PCP

Esta é a etapa fundamental para a garantia da qualidade das PCP produzidas. É nela que são empregadas as máquinas de vibro-compressão. Esta máquina é de grande importância, pois é ela que irá imprimir elevados graus de compactação e vibração, simultaneamente, aos concretos “secos”, interferindo, significativamente, nas principais propriedades das peças, como resistência à compressão, textura, entre outros.

É nesta fase de produção que são definidos os tempos de alimentação e de vibro-compressão da máquina, tempos estes de fundamental importância na qualidade final dos produtos.

Tempo de alimentação: é o tempo em que a gaveta permanece sobre a forma, com os agitadores ligados para enchimento dos vazados,

sendo acionado, simultaneamente, o sistema de vibração para facilitar e enchimento das formas pelo concreto. Este é o único tempo regulável de uma máquina de vibro-compressão e é o principal responsável pelo grau de compacidade das peças, pois quanto maior o tempo de alimentação, maior será a quantidade de concreto na forma, diminuindo, assim, o volume de vazios das mesmas e, conseqüentemente, aumentando sua resistência à compressão.

Seu contínuo ajuste é importante para um adequado enchimento das formas.

Tempo de vibro-compressão: é o tempo decorrido desde o contato das sapatas do contramolde com o concreto, até o alcance da altura final da peça. Neste período, o sistema de vibração permanece ligado. Normalmente, este tempo gira em torno de três a seis segundos, sendo função do equipamento e dos materiais empregados, bem como do tempo de alimentação. Este tempo é um indicativo de um bom ou mau enchimento da forma. Tempos insuficientes levarão à obtenção de peças porosas e de baixa resistência, enquanto que tempos excessivos aumentarão o tempo de ciclo de produção e o desgaste do equipamento.

Muitas empresas utilizam o tempo de vibro-compressão como parâmetro de controle de produção.

Para o melhor entendimento do funcionamento destes equipamentos e de sua influência sobre as propriedades finais das peças, estão descritas, a seguir, as principais características das máquinas vibro-prensas, além de cada fase que compõe esta etapa de moldagem.

2.2.4.1 Máquinas vibro-prensas

Uma máquina vibro-prensa, como é chamado um equipamento de vibro-compressão, é formada, basicamente, por: silo de armazenamento; gaveta; sistema de compressão; forma ou molde; sistema de vibração (Figura 5).



Figura 5: Principais partes de uma máquina vibro-prensa.

a) Silo de Armazenamento

Localizado na parte superior do equipamento de vibro-compressão, é o recipiente responsável pelo armazenamento do concreto proveniente do misturador para posterior enchimento da gaveta. O

volume do silo de armazenamento varia bastante, conforme o fabricante, não sendo recomendados silos muitos grandes, pois podem proporcionar enchimentos diferenciados durante a produção. A alimentação do silo de armazenamento pode ser feita por correia transportadora ou por gravidade. Em ambos os casos, deve-se atentar para que a quantidade de material dentro do silo seja insuficiente para fazer montes de concreto, provocando, assim, o acúmulo de agregados graúdos nas laterais deste monte e uma maior concentração de finos no meio. Isso causaria uma alimentação diferenciada pela gaveta às formas e produziria peças heterogêneas.

No caso da alimentação do silo por correias transportadoras, outro fator importante é a velocidade da mesma. Esta deve ser rápida o suficiente, a fim de evitar a desagregação do material dentro dos silos.

b) Gaveta

A gaveta é um compartimento móvel, que transporta o concreto do silo de armazenamento para a forma. Nela, o compartimento do concreto está separado do compartimento do motor por uma chapa transversal, conforme mostra a Figura 6. Além destes compartimentos, a gaveta possui: conjunto de agitadores; raspador de forma e das sapatas.

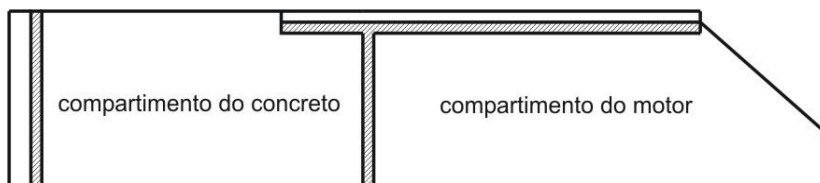


Figura 6: Corte longitudinal da gaveta.

Conjunto de agitadores – são barras metálicas localizadas dentro da gaveta, no compartimento do concreto, com a função de revolver o mesmo, facilitando, assim, o enchimento da forma. Existem diversos tipos de agitadores, conforme o modelo da máquina e seu fabricante, sendo que os agitadores utilizados para a Produção de PCP são diferentes dos utilizados para a fabricação de blocos de concreto. A Figura 7 mostra um tipo de agitador utilizado na produção de PCP.

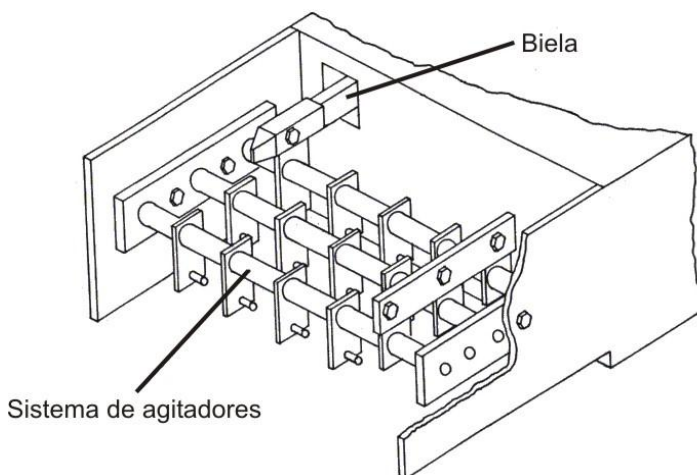


Figura 7: Detalhes da gaveta (conjunto de agitadores).

Raspador da forma – é uma placa de material plástico com recortes, para permitir a raspagem do excesso de concreto sobre a forma, no retorno da gaveta. Este raspador possui recortes, para permitir regulagens, de acordo com o desgaste. (Figura 8)

Raspador das sapatas – é uma placa de borracha e tem a função de limpar as sapatas, no retorno da gaveta. (Figura 8)

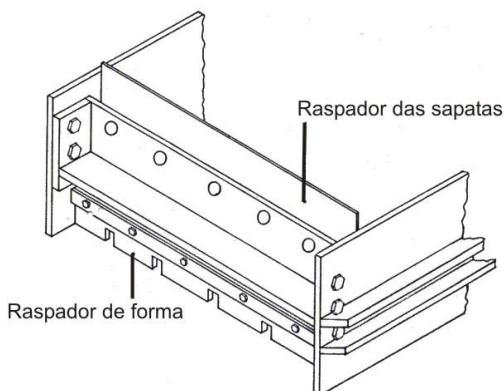


Figura 8: Detalhes da gaveta (Raspadores de forma e das sapatas).

O mecanismo de funcionamento da gaveta é o seguinte: quando recuada, ela fica com o compartimento de concreto sob o silo de armazenamento, enchendo, assim, a gaveta. Em seguida, quando acionada, a gaveta desloca-se para frente, ficando com o compartimento de concreto em cima da forma, para a alimentação da mesma. Enquanto o compartimento de concreto fica sobre a forma, o compartimento do motor fica sob o silo de armazenamento e vice-versa. (Figura 9).

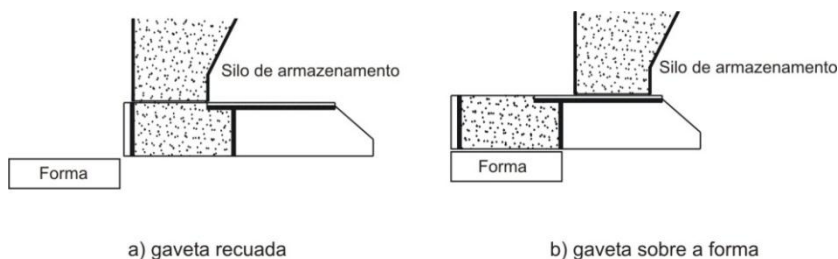


Figura 9: Funcionamento da gaveta.

c) Sistema de Compressão

É o sistema formado geralmente pelas sapatas, viga flutuante e pelo pistão hidráulico ou pneumático. É responsável pela aplicação da carga de compressão, no momento da moldagem do concreto dentro das formas.

Sapatas – Também conhecidas como contra molde, as sapatas são a extremidade inferior do sistema de compressão, responsáveis pela transferência direta da carga da viga flutuante e, eventualmente, dependendo do equipamento, da carga do pistão hidráulico ou pneumático para o concreto, durante a fase de vibro-prensagem das peças (OLIVEIRA, 2004).

Apresentam, geralmente, superfície tratada termicamente a fim de aumentar sua dureza superficial diminuindo, assim, o desgaste por atrito lateral às formas. Muitos dos equipamentos, atualmente disponíveis no mercado, já dispõem de sapatas aquecidas. Esse sistema de aquecimento evita a aderência do concreto da PCP às sapatas, evitando problemas “estruturais” às peças, bem como a parada constante do equipamento para a limpeza das mesmas (Figura 10).



Figura 10: Detalhe das sapatas aquecidas de um equipamento de vibro-compressão.

Viga flutuante – A viga flutuante é formada, normalmente, por dois perfis “Us” perfeitamente soldados, fixados em suas extremidades às hastes laterais da máquina.

Pistão hidráulico ou pneumático – O pistão hidráulico ou pneumático é o dispositivo que suspende a viga flutuante e as sapatas, sendo que, em alguns equipamentos, esse pistão ajuda na aplicação da carga de compressão sobre o concreto, aumentando, consideravelmente, o nível de carregamento. O nível de carregamento de uma máquina onde o pistão funciona como aplicador de carga gira em torno de 2,0 a 3,0kg/cm², enquanto que, em um equipamento onde o único aplicador de carga é a viga flutuante, varia entre 0,5 e 1,0kg/cm² (OLIVEIRA, 2004).

d) Forma ou molde

Forma ou molde é onde o concreto trazido pela gaveta fica armazenado, dando formato às peças e a precisão dimensional necessária. É substituída conforme o modelo de peças que se pretende produzir.

Para aumentar a durabilidade e permitir que os moldes resistam ao constante atrito sofrido durante a moldagem das PCP, a superfície interna é tratada termicamente para aumentar sua dureza superficial. (Figura 11)



Figura 11: Molde de uma vibro-prensa para produção de PCP.

e) Vibração

O mecanismo de vibração das vibro-prensas é responsável direto pela qualidade dos componentes moldados. Isto se explica pelo fato de todas as máquinas utilizarem a vibração como meio de adensamento do concreto e por ser o adensamento do concreto um dos principais responsáveis pela maior compacidade e, conseqüentemente, pela maior resistência das peças. De maneira geral, a melhor vibração é aquela que

permite obter, num tempo mínimo, peças de qualidade homogênea em todos os pontos da forma (MEDEIROS, 1993).

Os parâmetros que caracterizam a vibração são: direção, frequência, amplitude, velocidade, aceleração e duração.

As vibro-prensas destinadas à produção de PCP possuem diferentes tipos de vibração quanto a sua direção. Podem ser classificados em: unidirecional vertical (Figura 12-a); unidirecional horizontal (Figura 12-b); circulares no plano horizontal (Figura 12-c); circulares no plano vertical (Figura 12-d).

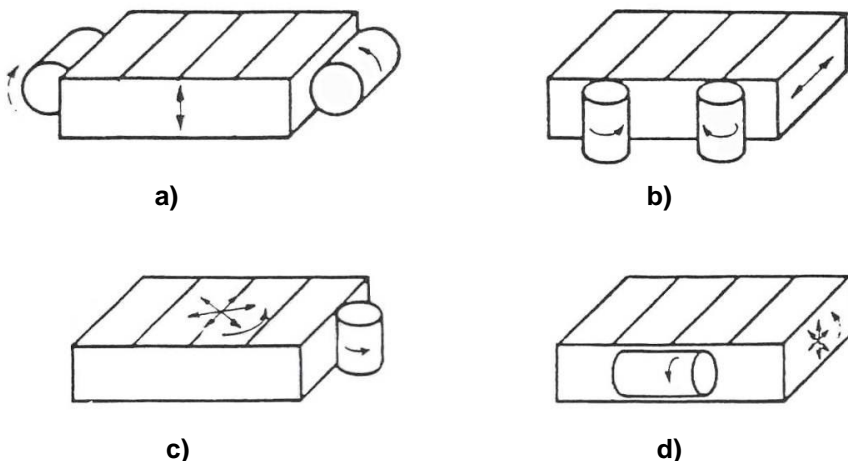


Figura 12: Tipos de vibração das vibro-prensas. a) Unidirecional vertical; b) unidirecional horizontal; c) circulares no plano horizontal; d) circulares no plano vertical.

A direção de vibração mais frequentemente empregada em máquinas vibro-prensas é a unidirecional vertical, obtida através da rotação de duas massas excêntricas, sincronizadas e, em sentidos opostos, a fim de neutralizar as forças horizontais centrífugas (BRESSION, 2001).

Além da direção, pode-se variar a frequência e a amplitude da vibração do equipamento. A amplitude (x) de uma vibração é a distância de um ponto do sistema em relação a sua posição média. Já a frequência (f) de uma vibração é igual ao número de ciclos por segundo, expressa em Hz. As frequências dos vibradores utilizados em vibro-prensas giram em torno de 40Hz (2.400rpm) e 75Hz (4.500rpm). Já quando a vibração

é acompanhada de efeitos de choque, podem atingir até 1.000 a 2.000Hz (MEDEIROS, 1993).

Segundo Medeiros (1993) a vibração a ser aplicada, nas vibroprensas, produtoras de PCP, devem ser valores próximos dos valores considerados ótimos (determinados em laboratório):

- Unidirecional vertical ou horizontal;
- Frequência de 50 Hz;
- Amplitude de 1,5 a 2,0mm.

Deve-se, ainda, se atentar para os seguintes aspectos relacionados à vibração:

- A vibração transmitida deve ser igual em todos os pontos da forma, garantindo, assim, uma produção uniforme qualquer que seja a posição da peça na mesma. Por isso, deve-se cuidar com o tamanho dos moldes, pois formas muito grandes, dependendo do sistema de vibração adotado, dificilmente obterão estas condições.
- As características da vibração devem ser constantes em relação ao tempo e reproduzíveis de um ciclo para o outro.

2.2.4.2 Mecanismo de funcionamento das máquinas vibro-prensas

O funcionamento de uma máquina na produção de PCP consiste, basicamente, nas seguintes etapas: inicialmente, o concreto proveniente do misturador é armazenado no silo de armazenamento da máquina. Em seguida, a gaveta (que está com o compartimento do concreto sob o silo) é preenchida com concreto (Figura 13-a). Então, inicia-se o ciclo acionando a gaveta para que esta leve o concreto até a forma, a fim de preenchê-la (Figura 13-b). Durante a passagem da gaveta sobre a forma são acionados os agitadores e os vibradores que possibilitam uma melhor alimentação e acomodação do concreto. A duração desta etapa é denominada tempo de alimentação. Este tempo deve ser ajustado de acordo com a mistura empregada e com as características do equipamento.

Após o enchimento da forma, a gaveta é recolhida, com o sistema de vibração desligado, a fim de evitar preenchimentos diferenciados nas diferentes posições da forma, além da segregação do agregado graúdo (Figura 13-c). Assim que a gaveta é recolhida, ocorre a descida das sapatas, responsável pela compactação das peças bem como a definição geométrica das mesmas. Simultaneamente à descida das sapatas, ocorre a vibração. O tempo decorrido nesta etapa é chamado de tempo de

vibro-compressão e tem seu término quando a peça atinge a altura desejada (Figura 13-d). Finalizando o tempo de vibro-prensagem, a forma juntamente com a sapata sobem e é realizada a desforma das peças (Figura 13-e). Então, uma nova chapa é posicionada, reiniciando o ciclo.

Existem, também, alguns equipamentos de vibro-compressão que são dotados de sistemas de alimentação com dois silos e duas gavetas, possibilitando a moldagem de peças de dupla camada (*double-cap*). Este sistema apresenta a vantagem de produzir peças com camadas superiores e inferiores, empregando-se, respectivamente, misturas finas e mais grossas, resultando em peças com excelente acabamento superficial e elevada resistência à compressão (BARFOOT, 1988). O funcionamento deste tipo de equipamento é muito semelhante a uma máquina de vibro-compressão comum. A única diferença consiste em ter dois tempos de alimentação e, em alguns equipamentos, dois tempos de vibro-compressão.

Para os equipamentos de vibro-compressão atualmente disponíveis no mercado, os tempos de ciclo variam de oito a 25 segundos, dependendo do tipo e do porte do maquinário empregado (OLIVEIRA, 2004).

É muito importante que se tenham parâmetros de controle de qualidade durante a produção das PCP. O melhor parâmetro de controle de uma produção é o peso das peças recém produzidas, isto porque, além de ser de fácil determinação, sabe-se que o peso das peças está diretamente ligado à resistência das mesmas, uma vez fixado um traço de concreto, pois quanto maior o peso, menor a porosidade e consequentemente maior a resistência mecânica das mesmas.

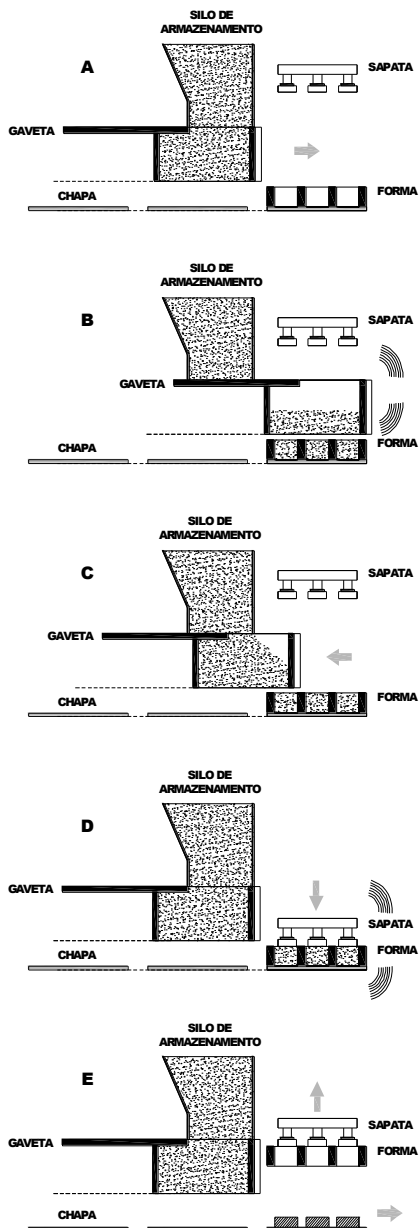


Figura 13: Sequência de funcionamento de uma máquina vibro-prensa (OLIVEIRA, 2004).

2.4.5 Cura

Ao fim do processo de moldagem das peças, deve-se proceder ao transporte das mesmas até o local da cura, sempre com cautela para evitar vibrações que possam danificar as peças recém produzidas. Dá-se o nome de cura ao conjunto de medidas que têm como finalidade evitar à evaporação precoce da água necessária a hidratação do cimento, já que as condições de umidade e temperatura, principalmente nas primeiras idades, têm muita importância nas propriedades do concreto endurecido. Vários são os métodos de cura.

Nas indústrias de pré-moldados, utilizam-se técnicas de cura térmica a vapor para acelerar o ganho de resistência mecânica do concreto em idades iniciais, possibilitando uma resistência mínima para desforma, manuseio ou utilização precoce.

Após a cura, as peças devem ser estocadas, preferencialmente em paletes, e armazenadas de forma a constituírem um *layout* que facilite sua identificação e carregamento dos caminhões que levarão o produto até as obras. A paletização facilita a operação de transporte e minimiza as quebras dos produtos, reduzindo os custos de reposição.

2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DAS PCP

A norma brasileira vigente que fixa as condições exigíveis para a aceitação de PCP é a NBR9781 (1987). Por esta norma, são fixados valores mínimos de resistência à compressão, além de limites dimensionais, porém, outras propriedades de fundamental importância para a qualidade das peças não são preconizadas pela mesma, como resistência a abrasão, textura superficial entre outros. Segundo Rodrigues (1986), fatores referentes à durabilidade são os que influenciam a fixação da resistência mínima das peças.

2.3.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão das PCP é o principal parâmetro de controle de qualidade das peças. Dentre as diversas especificações de resistência mecânica encontram-se valores desde 35MPa (Brasil) até 60MPa (Alemanha). Além da divergência nos valores mínimos a serem alcançados, as metodologias de ensaio também são distintas (RODRIGUES, 1984).

A tabela 2 apresenta as resistências especificadas pelas normas vigentes de alguns países, além dos métodos de ensaio adotado.

Tabela 2: Resistências à compressão especificadas pelas principais normas vigentes.

Norma	Resistência	Tipo	Método de ensaio
ASTM C936 EUA	$> 55 \text{ MPa}$	média	carregamento total
NBN B21-311 Bélgica	$\geq 60 \text{ MPa}$ $> 4,5 \text{ MPa}$	média média	carregamento total ou extração de corpos- de-prova cilíndricos e cúbicos <i>split test</i>
AFNOR – EN 1338 França	$\geq 4,0 \text{ MPa}$	característica	<i>split test</i>
BS 6717 Inglaterra	$\geq 49 \text{ MPa}$	média	carregamento total
AS/NZ 4455/4456 Austrália	$\geq 2 \text{ MPa}^1$ ($\geq 2 \text{ kN}^1$) $\geq 3 \text{ MPa}^2$ ($\geq 5 \text{ kN}^2$) $\geq 4 \text{ MPa}^2$ ($\geq 10 \text{ kN}^3$)	característica	flexão (<i>breaking load</i>)
DIN 18501 Alemanha	$> 63,6 \text{ MPa}^4$	média	carregamento total extração de corpos- de-prova cúbico carregamento parcial (punção dupla)
NBR 9780/9781 Brasil	$\geq 35 \text{ MPa}^5$ $\geq 50 \text{ MPa}^6$	característica	carregamento parcial (punção dupla)

Fonte: Third International Conference on Concrete Block Paving. Rome, Italy, 1988

OBS: a Norma AS/NZ 4455 especifica, também, a carga de ruptura à flexão como parâmetro de resistência;

- 1 – aplicação residências;
- 2 – passeios públicos e vias de tráfego leve;
- 3 – áreas industriais;
- 4 – resistência à compressão dependente da altura da peça ($h = 80$ mm – 63,6 MPa; $h = 200$ mm – 60,0 MPa);
- 5 – solicitação de veículos comerciais de linha;
- 6 – tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuado efeito abrasivo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou o ensaio de carregamento parcial como sendo o método de ensaio normalizado para a determinação da resistência à compressão das PCP. O método, preconizado na NBR 9780 (1987), consiste em fazer um carregamento parcial da peça por meio de pastilhas auxiliares (circulares) colocadas em contato com as duas faces da peça, perfeitamente alinhadas, simulando um “puncionamento duplo”.

Contudo, segundo Rodrigues (1984), essa forma de ensaio, quando comparado com a de carregamento total da peça, conduz a valores cerca de 15% menores. Entretanto, o valor observado é ainda superior ao que seria obtido ao romper-se um corpo-de-prova cilíndrico confeccionado com concreto de mesma composição e compacidade devido à baixa relação altura/diâmetro e confinamento da porção de concreto que circunda o cilindro puncionado durante o ensaio. Para tentar minimizar as influências das dimensões das peças no resultado do ensaio, foram tomadas as seguintes providências:

- A largura máxima das peças foi limitada em 140mm, pois o carregamento parcial das peças faz com que a área não carregada exerça um esforço de cintamento sobre a região central;
- Foram adotados fatores de correção dos resultados do ensaio, em função da altura das peças. As peças de 80mm de altura foram tomadas como padrão (fator de correção igual a 1,0) e para as peças com altura de 60 e 100mm, foram aplicados fatores de minoração e majoração, respectivamente. Esses fatores de correção são apresentados na Tabela 3 em função das alturas especificadas pela NBR 9780 (1987). (OLIVEIRA, 2004).

Tabela 3: Fatores de correção em função da altura das peças.

Altura das peças (mm)	Fator de correção
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: NBR 9780 (1987)

2.3.2 Variação dimensional

Segundo a NBR 9781 (1987), a largura e o comprimento das peças não devem diferir de 3mm das medidas especificadas, enquanto que a altura não deverá diferir de 5mm (para mais ou menos).

2.3.3 Resistência à abrasão

Esta é uma característica também muito importante em se tratando de PCP que está ligada diretamente à durabilidade das peças.

Vários são os métodos para determinação desta propriedade, cada qual com suas especificações quanto a limites de aceitação. No Brasil, ainda não há limites de aceitação e métodos de ensaio para avaliação desta propriedade preconizada por normas.

2.3.4 Textura superficial

A norma NBR9781 (1987) recomenda que as peças devam ser inspecionadas visualmente objetivando a identificação de peças com defeitos que possam vir a prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento.

Apesar desta recomendação, não há nenhuma metodologia para avaliação quantitativa das condições superficiais das peças e limites de aceitação para as mesmas, sendo esta característica avaliada de forma subjetiva.

Segundo Oliveira (2004), uma forma de avaliação que vem sendo empregada na indústria cerâmica e parece ser uma tendência na área dos

concretos, é a caracterização através da análise de imagens digitais. O referido autor desenvolveu uma metodologia para esta análise, que consiste em utilizar um scanner como ferramenta para a aquisição de imagens. Este scanner era usado em condições pré-estabelecidas, padronizadas. Uma vez adquiridas as imagens, as mesmas eram comparadas a uma escala de PCP, ordenadas em função do olho humano (de um lado, peças mais fechadas com tonalidade uniforme, normalmente cinza claro. Por outro lado, peças mais porosas, com variação de tonalidade, onde os poros apresentavam uma tonalidade mais escura). Através dos resultados obtidos, pode-se verificar que o desvio padrão obtido através do histograma das imagens digitalizadas em tons de cinza correlaciona bem com a escala do olho humano, sendo, assim, considerado um bom método a ser empregado.

2.3.5 Absorção

Assim como outras características acima citadas, as normas brasileiras não especificam limites para de absorção para a PCP. Porém, existem algumas normas internacionais (Tabela 4) que especificam limites visando à durabilidade das referidas peças. As normas que especificam limites para esta propriedade são, normalmente, normas de países que sofrem a ação de gelo e degelo.

Tabela 4: Limites quanto à absorção das peças para pavimentação.

Norma	Absorção (%)	Tipo
ASTM C936 EUA	$\leq 5,0$	valor médio
	$\leq 7,0$	individual
NBN B21-311 Bélgica	$\leq 5,0$	valor médio
	$\leq 5,5$	individual
AFNOR – EN 1338 França	$\leq 5,4$	valor característico
	$\leq 5,7$	individual

Fonte: Third Internacional Conference on Concrete Block Paving. Rome, Italy, 1988.

3. MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE PCP

Os principais insumos empregados na fabricação de PCP são: cimento Portland, brita 1, brita 0 ou pedrisco e granilha, areias naturais e/ou de britagem, aditivos, água e eventualmente pigmentos.

Para melhor entendimento de como estes constituintes influenciam na mistura final, é de grande importância o conhecimento das características dos mesmos.

3.1 CIMENTO PORTLAND

A escolha do tipo de cimento apropriado deve levar em conta quais as condições técnicas de desempenho necessárias, bem como a disponibilidade deste material na região. O cimento mais adequado para a fabricação de PCP é o CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), em função da elevada resistência que proporciona nas primeiras idades, permitindo, assim, a desforma (retirada da PCP da chapa metálica onde é produzida) e a paletização mais rápida dos produtos. O desenvolvimento desta maior resistência inicial se deve ao fato de este tipo de cimento possuir uma moagem mais fina que o cimento comum, além de uma composição diferente (geralmente um teor mais alto de C_3S). Entretanto, o mais utilizado, atualmente, para a fabricação de PCP na região sul do Brasil é o CPV ARI RS (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial resistente a sulfatos), devido à falta de disponibilidade no mercado do CPV ARI. A diferença entre eles consiste em que, no CPV ARI RS, há a adição em torno de 12 % de cinza volante, diminuindo, assim, o custo energético (já que se diminui a quantidade de clínquer empregado) e final do produto para as empresas produtoras de cimento. A diminuição da quantidade de clínquer leva a uma diminuição proporcional da quantidade de C_3A e do próprio C_3S , responsável para liberação de $Ca(OH)_2$ na hidratação, reduzindo, assim, o risco de ataque por sulfatos. Esta redução na quantidade de $Ca(OH)_2$ também diminui a ocorrência de eflorescências na superfície das peças, o que é uma vantagem, tornando este tipo de cimento um dos preferidos para a produção das PCP. Além disso, a utilização de um produto com uma menor quantidade de clínquer é de extrema importância para a busca de processos mais sustentáveis.

Há também outros tipos de cimento que são utilizados para a fabricação das PCP como: CPII Z (Cimento Portland composto com pozolana) e o CP IV (Cimento Portland pozolânico). A norma NBR9781

(ABNT, 1987) permite o uso de cimento de qualquer tipo e classe, desde que obedecem a suas respectivas normas.

Recomenda-se que o consumo de cimento para produção de PCP com resistência característica à compressão (f_{pk}) de 35MPa esteja entre 300 e 400 kg/m³ de concreto. Porém, a determinação desse consumo está intimamente ligada ao equipamento empregado, ou seja, com um mesmo traço, podem-se produzir peças com diferentes resistências mecânicas, desde que estas apresentem uma maior ou menor compacidade. Traços com um consumo de cimento muito baixo podem apresentar problemas de segregação, além de dificilmente alcançarem as resistências estabelecidas por norma para PCP. Por outro lado, um consumo muito elevado pode comprometer o ciclo de produção das peças por problemas de coesão exagerada e aderência indesejável às sapatas durante a compressão das peças.

3.2 AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS

A qualidade dos agregados é de fundamental importância para a obtenção das propriedades requeridas nas PCP. Segundo Medeiros (1993), as características destes materiais podem interferir na aderência com a pasta de cimento, influenciando, assim, a resistência das peças. Outro fato que influencia na resistência das PCP, é a resistência mecânica dos próprios agregados, e/ou presença de microfissuras internas uma vez que estes ocupam a maior parte do volume existente no concreto e, também, permitem maior ou menor grau de compactação, de acordo com sua distribuição granulométrica e, principalmente, com a forma do grão.

Os agregados miúdos mais comumente empregados na produção de PCP são as areias naturais (de rio ou de cava). Porém, cada vez mais vêm sendo utilizadas as areias de britagem e/ou pó de pedra, provenientes do britamento de rochas. A escolha depende, entre outros fatores, da disponibilidade dos mesmos na região.

Quanto à distribuição granulométrica das areias, Ferreira (1991) e Medeiros (1993) ressaltam que esta deve ser contínua, pois a falta de continuidade desse material pode interferir na qualidade das peças produzidas.

Além disso, deve-se exigir que a areia apresente outros requisitos de qualidade, como teores de argila, materiais carbonosos e materiais pulverulentos inferiores a 1,5%, 1,0% e 3,0%, respectivamente, a

quantidade de impurezas orgânicas deve ser inferior a 300ppm (RODRIGUES, 1984).

Os agregados graúdos empregados para a fabricação de PCP são os provenientes do britamento de rochas estáveis (brita “0”, também conhecida como pedrisco). Estes são mais indicados por apresentarem, geralmente, menos microfissuras internas e uma melhor extensão de aderência com a pasta de cimento, o que favorece a obtenção de resistências mecânicas mais elevadas.

A dimensão máxima característica deve ser menor que a quarta parte da menor dimensão da peça. Em peças de 80mm, por exemplo, pode-se, teoricamente, usar agregados de até 20mm, porém, a fim de se evitar danos nos equipamentos e contribuir para uma melhor textura superficial da peça, utiliza-se frequentemente dimensões máximas características de até 9,5mm (brita “0”).

Outras propriedades também devem ser observadas nos agregados graúdos conforme estabelece a norma NBR7211 (ABNT, 2009) tais como: teor de material pulverulento ($<1,0\%$), teor de partículas friáveis ($<2,0\%$) e materiais carbonosos ($<1,0\%$). O índice de forma deve ser inferior a 3.

3.3 ÁGUA

A qualidade da água também tem um papel importante: impurezas contidas na água podem influenciar negativamente na resistência do concreto ou causar manchas na sua superfície. A água de amassamento não deve conter matérias orgânicas indesejáveis nem substâncias inorgânicas em teores excessivos (NEVILLE, 1997).

Geralmente a água potável, fornecida pela rede normal de abastecimento é satisfatória para a produção do concreto. Caso seja necessária a utilização de água não tratada, é recomendada a análise da mesma antes do seu emprego.

Para a produção de PCP, a quantidade de água empregada é diferente dos concretos convencionais, girando em torno de 5 a 7,5%, enquanto que os concretos plásticos em torno de 8 a 12%. Tango (1994) recomenda que a quantidade de água ideal para a produção de blocos seja a máxima possível, desde que não prejudique a desforma dos produtos. O mesmo deve ser aplicado as PCP, sendo que a quantidade de água deve ser a máxima possível, compatível com o equipamento de vibro-compressão empregado.

3.4 ADITIVOS

A NBR 11768 (ABNT, 1992) define os aditivos como “produtos que adicionados em pequenas quantidades a concretos e argamassas de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições”.

Os aditivos são um componente importante usado amplamente de forma crescente. O motivo do grande crescimento do uso de aditivos é a capacidade de proporcionar ao concreto consideráveis melhoras físicas e econômicas (NEVILLE, 1997).

São diversos os tipos de aditivos oferecidos pelo mercado, sendo que, para a fabricação de PCP, os mais utilizados são os incorporadores de ar, uma vez que o concreto seco tem consistência seca e baixa plasticidade. Para concretos plásticos, estes aditivos que são substâncias orgânicas em solução aquosa, adicionadas ao concreto, introduzem uma quantidade de minúsculas bolhas de ar que desempenham, simultaneamente, o papel de fluido e de agregado fino (Tabela 5). No concreto fresco, eles promovem uma melhoria na trabalhabilidade, além da redução na segregação devido ao aumento da coesão, como afirma Rodrigues (1984). Já no estado endurecido, a perda de resistência à compressão por causa do ar incorporado, é, em parte, amenizada pelas reduções da relação água/cimento e da porosidade do concreto, devido ao efeito plastificante e à diminuição do atrito interno, provocados pelo aditivo.

Para os concretos “secos”, sabe-se que a adição deste aditivo também melhora a trabalhabilidade do mesmo, mas, estima-se, que neste caso, não há a formação das bolhas, ou se são formadas com a alta vibração dos equipamentos de vibro-compressão, elas desaparecem. Portanto, não existe um consenso ainda sobre o mecanismo de funcionamento deste aditivo no concreto empregado para a fabricação de PCP.

Tabela 5: Efeito predominante do aditivo incorporador de ar na pasta de cimento.

Incorporador de Ar	
Molécula presente no aditivo	Cadeia de hidrocarboneto não-polar com um grupo polar
Interface ar-água	Grupos polares são orientados em direção à água, reduzindo a tensão superficial favorecendo a formação de bolhas.
Interface sólido-água	Grupo polar liga-se ao sólido e o grupo não polar fica orientado para a água, tornando a partícula de cimento hidrófoba.
	O ar desloca a água e fica ligado às partículas de cimento como bolhas.

Fonte: Santos, Ana Cristina Melim Benthien (2009).

4. MÉTODO DE DOSAGEM

A dosagem de um concreto “seco” busca atingir os critérios de desempenho exigidos pelas normas vigentes, além de um bom acabamento superficial para as peças produzidas, a um custo minimizado. Existem diversos métodos de dosagem empregados para PCP e blocos de concreto, sugeridos por pesquisadores e por fabricantes de equipamentos de vibro-compressão. Como exemplo destes métodos, pode-se citar: método de dosagem proposto pela Columbia; método de dosagem proposto pela Besser Company (adaptado por Medeiros, 1993); método de dosagem proposto pela ABCP; método de dosagem do IPT/EPUSP (adaptado por Tango, 1994), entre outros. Porém, todos estes métodos demandam testes excessivos nas máquinas vibro-prensas, além de não levarem em consideração peculiaridades e características inerentes ao processo produtivo. Considerando isso, será descrito abaixo o método de dosagem que será utilizado como base neste trabalho. É o método proposto por Oliveira (2004), com algumas alterações implementadas pelo grupo GTec-UFSC. A metodologia de dosagem proposta por Oliveira (2004), específica para PCP, por sua vez, foi resultado de alguns ajustes e modificações no método proposto por Frasson (2000) para blocos de concreto.

4.1 DEFINIÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS PCP

Como o método é baseado nas resistências médias das peças, é necessário, através da fórmula a seguir, determinar essa resistência levando-se em conta a resistência característica exigida e o desvio-padrão de produção, lembrando que, para solicitações de veículos comerciais de linha, a norma NBR 9781 (1987) exige uma resistência característica de 35MPa, enquanto que, para solicitações de veículos especiais ou com acentuado efeito de abrasão, exige 50MPa.

$$F_{pj} = F_{pk} + t \cdot Sd$$

Onde: F_{pj} = Resistência média de dosagem a j dias;

F_{pk} = Resistência característica das PCP segundo prescrições da NBR 9781 (1987);

t = coeficiente de *Student* considerando-se uma significância de 20%

Sd = Desvio padrão de dosagem.

O valor do desvio padrão S_d é função de uma série de fatores, tais como variabilidade dos materiais empregados e os inerentes ao processo produtivo. Para a definição do desvio padrão da resistência à compressão das peças, o autor sugere o emprego da curva apresentada abaixo.

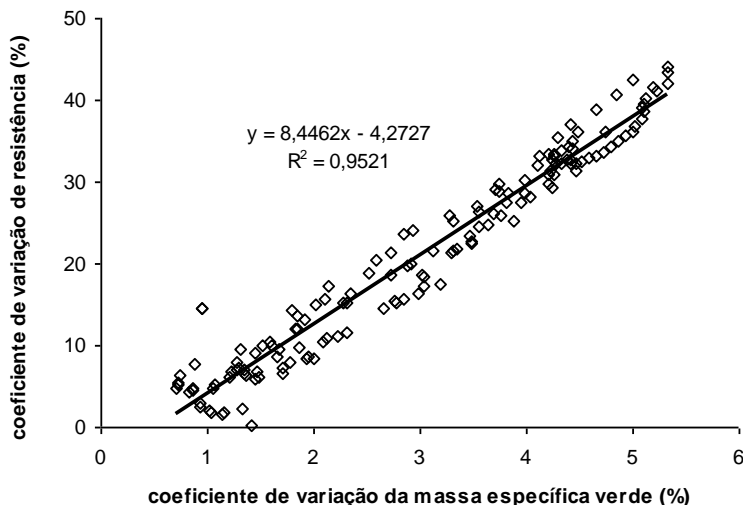


Figura 14: Coeficiente de variação da resistência a compressão em função do coeficiente de variação da massa específica no estado verde das PCP.

4.2 ESCOLHA E PROPORCIONAMENTO DOS AGREGADOS

Os agregados miúdos recomendados para serem empregados na produção de PCP são os de forma mais arredondada possível, sendo comum a utilização de dois ou mais agregados miúdos nas misturas. O agregado miúdo, ou o proporcionamento entre miúdos, deve apresentar módulo de finura entre 2,20 e 2,80.

Já o agregado graúdo mais utilizado é o material passante na peneira 9,5mm e retido da peneira de 4,8mm, comumente denominado pedrisco. Recomenda-se que o agregado graúdo seja o mais cúbico possível.

As proporções entre agregados graúdo e miúdo são definidas por tentativas, com o auxílio do equipamento de moldagem dos corpos-de-prova 9 x 8cm.

Inicia-se o processo pelo estudo de um traço piloto fixando-se: o traço da mistura (1:5 – cimento: agregados), umidade (7,0%), teor de pedrisco no agregado total (25%) e massa específica do concreto após compactação ($2,28\text{kg/dm}^3$).

Fixados estes parâmetros, são feitas variações nas proporções de areia fina e grossa. Esta variação é feita em intervalos de 10%, começando com 0% de areia fina. Com este concreto, são moldados dois corpos-de-prova 9 x 8 cm, para a avaliação da energia e do tempo necessário para a moldagem, além da textura obtida. Caso a umidade pré-estipulada conduza a uma mistura com excesso de água, repete-se o procedimento, reduzindo essa porcentagem. A verificação da umidade ótima é feita de uma forma empírica, denominada usualmente “ponto de pelota”. Este método empírico consiste na moldagem de uma pelota com as mãos, empregando-se a mistura analisada, avaliando-se as condições das palmas das mãos com relação à umidade. Caso as palmas das mãos fiquem levemente umedecidas pela água do concreto, essa quantidade é tida como ideal (umidade ótima). Caso as palmas das mãos apresentem-se muito secas ou muito úmidas, deve-se, respectivamente, aumentar ou reduzir a quantidade de água da mistura (Figura 15).



Figura 15: Avaliação empírica da umidade da mistura: na umidade ótima a mão fica levemente suja com a pasta de cimento.

O proporcionamento mais adequado entre os agregados miúdos é aquele que resultar na menor energia de compactação para a moldagem das peças e, ao mesmo tempo, uma boa textura (fechada).

Definidas as proporções ideais entre os agregados miúdos, parte-se para o ajuste do agregado graúdo, que, na parte inicial, foi pré-fixado. Da mesma forma que o agregado miúdo, são feitas variações nas proporções de pedrisco. Geralmente, quanto mais agregado graúdo consegue-se incorporar à mistura, menor a energia de compactação, devido a redução do atrito interno da mistura. Porém, o excesso de agregado graúdo prejudica a textura das peças. Assim sendo, a quantidade ideal de agregado graúdo é a maior possível, desde que não comprometa a textura das peças.

Geralmente, as proporções de agregados giram em torno de 20 a 40% de agregado graúdo e 80 a 60% de agregado miúdo, dependendo dos materiais e tipo de equipamento de vibro-compressão utilizado.

4.3 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Após a determinação do proporcionamento das diferentes misturas a serem testadas, deve-se moldar os corpos-de-prova. Para realizar a moldagem dos mesmos, o material empregado deve ser, primeiramente, pesado, de modo que após a compactação se consiga a massa específica desejada.

Para a moldagem dos corpos-de-prova é utilizado um soquete de compactação, semelhante ao equipamento de Marshall (para misturas asfálticas), e um molde cilíndrico metálico que possui 90mm de diâmetro e 160mm de altura. A moldagem se inicia com o posicionamento de uma pastilha de náilon de 35 mm na parte inferior do molde e o acoplamento do conjunto (molde + pastilha de náilon de 35mm) na base de apoio, despejando-se, posteriormente, dentro do molde, a quantidade de concreto predeterminada (Figura 16-a).

Após a perfeita fixação do molde na base de apoio, encaixa-se a pastilha de 40mm na parte superior do mesmo (Figura 16-b) e, com o auxílio de uma marreta, realiza-se a compactação manual até que o batente da pastilha de náilon atinja o topo do molde (Figura 16-c). Pelo fato do molde possuir um comprimento de 160 mm e as pastilhas de regulagem de altura 35 e 40mm, o corpo-de-prova apresenta, nesta fase de compactação, uma altura de 85 mm.

Para que se tenha início a segunda fase da moldagem do corpo-de-prova, inverte-se o molde (giro de 180°), retira-se a pastilha de 35 mm (Figura 16-d) e acopla-se a ponta do soquete de compactação no topo do molde (Figura 16-e). Como esta ponta apresenta um

comprimento de 40mm, é necessário que sejam compactados os últimos 5mm, aplicando-se uma energia constante por golpe.

Quando o batente da ponta do soquete atinge o topo do molde cilíndrico (altura do corpo-de-prova = 80 mm), conforme apresentado na Figura 16-f, encerra-se a fase de compactação, executando-se, então, a desmoldagem do corpo-de-prova com o auxílio de um cilindro maciço de náilon. Para tal, o molde é desprendido da base de apoio, sendo removida a pastilha de 40mm localizada na parte inferior do mesmo. Posicionando-se o conjunto (molde + corpo-de-prova) sobre o cilindro de náilon, pressionam-se levemente as abas do molde para que o mesmo deslize por fora do cilindro de náilon, liberando o corpo de prova (Figuras 16-g e 16-h).

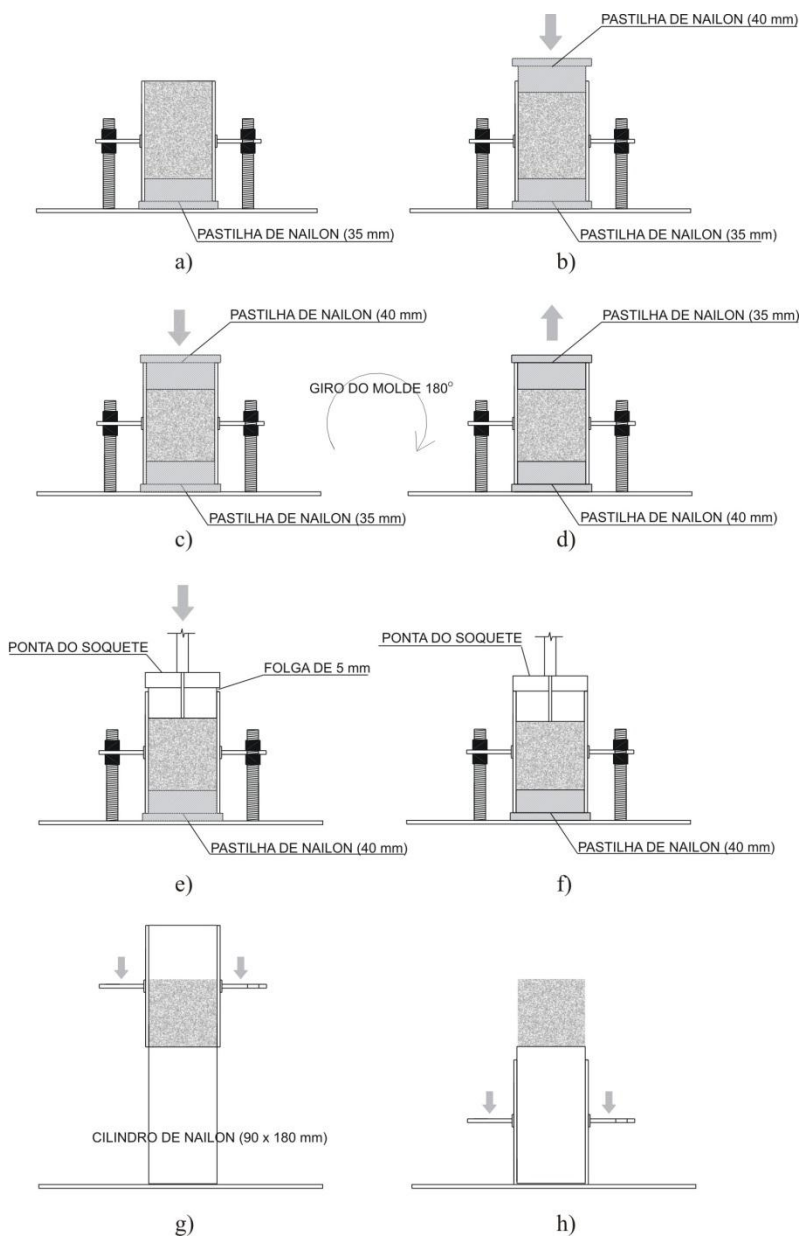


Figura 16: Sequência de moldagem dos corpos-de-prova 9x8cm (OLIVEIRA, 2004).

4.4 PRODUÇÃO DAS MISTURAS E CURA DOS CORPOS-DE-PROVA

A fim de se abranger a faixa de resistência comumente empregada para PCP (de 35 a 50 MPa), a metodologia propõe que sejam moldados corpos-de-prova com três massas específicas distintas, compreendidas entre 2,15 a 2,30 kg/dm³ (massa específica mínima, média e máxima), e nas proporções de 1:3,5, 1:5 e 1:6,5 (para verificar a influência do consumo de cimento).

Outro fator importante a ser verificado, é a umidade ótima. Sugere-se iniciar a produção dos corpos-de-prova com uma umidade de 6,0% e ir variando de 0,5 em 0,5 % até o ponto onde começam a aparecer indícios de pasta no topo do corpo-de-prova logo após a compactação. Deve ser lembrado que, na produção, a quantidade de água ideal é a máxima possível, desde que não prejudique a produtividade (colagem frequente das peças na sapata ou aparecimento de “borrachudo” na peça (peças apresentam flexibilidade e “estufam” após a desforma, que é uma expressão usual para a resposta elástica que pode apresentar a PCP quando comprimida pelo equipamento de vibro-compressão).

Após a moldagem das peças, as mesmas devem ser curadas. A cura dos corpos-de-prova deve ser realizada em caixas de isopor, com lâmina de água no fundo. Quando feitos na fábrica, pode-se empregar para os corpos-de-prova o mesmo procedimento de cura utilizado para as PCP produzidas.

Deve-se, também, determinar a área média dos corpos-de-prova, que pode ser definida pela seguinte expressão:

$$área\ média_{cp} = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

Onde: d = diâmetro real do corpo-de-prova 9 x 8 cm.

Encontradas as áreas e as alturas dos corpos-de-prova (para a determinação de seu volume real) os mesmos devem ser capeados com pasta de cimento, a fim de regularizar suas superfícies. Então, os corpos-de-prova voltam para a câmara de cura até completar 26 dias, em seguida, são imersos em água por 48 horas, quando se fará o rompimento das peças para a determinação da resistência à compressão, aos 28 dias.

4.5 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DOSAGEM E TRAÇO A SER TESTADO EM FÁBRICA

A partir dos resultados de resistência à compressão obtidos dos corpos-de-prova cilíndricos 9 x 8cm, são traçadas as curvas de resistência em função das massas específicas, para cada proporção utilizada, conforme apresentado na Figura 17.

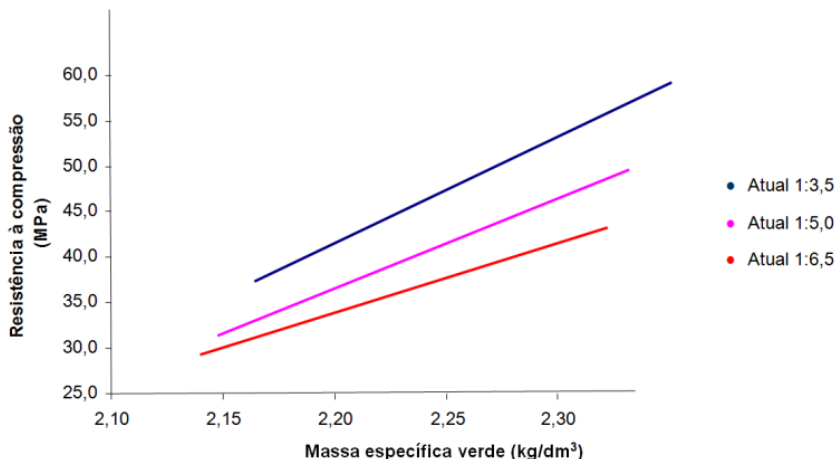


Figura 17: Curvas de resistência à compressão dos corpos-de-prova 9x8cm por massa específica no estado verde para as diferentes proporções empregadas.

Com a resistência de dosagem determinada (fc_j) (item 2.5.1), faz-se uma correção para levar em conta o fato de que as peças compactadas com soquete apresentam uma resistência um pouco inferior a das peças compactadas por vibro-compressão (fc_j').

$$fc_j' = K \cdot fc_j$$

onde:

fc_j' = resistência de dosagem corrigida

fc_j = resistência de dosagem

K = constante (atualmente adota-se 0,80)

Com o valor de fc_j' , entra-se na curva de dosagem e, a partir de uma dada massa específica, que será função da capacidade de prensagem da vibro-prensa, determina-se o traço por interpolação.

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A realização de estudos estritamente em fábricas produtoras de PCP é um processo que dispende muito tempo e insumos, tornando-se, assim, trabalhoso, demorado e antieconômico. Além disso, sabe-se que a produção de PCP depende de inúmeras variáveis e que estas devem ser avaliadas de forma conjunta, para que o resultado apresentado seja confiável. Assim sendo, entende-se a necessidade da realização de estudos preliminares em laboratório como meio de avaliar, de forma mais racional, as características das PCP, como resistência à compressão, textura, compacidade, além dos fatores influentes nas mesmas como granulometria, proporcionamento de agregados, tipo e teor de agregados miúdos, tipo e teor de cimento, diferentes massas específicas dos concretos e umidade das misturas, mesmo sabendo-se que as condições de moldagem (ex: ausência de vibração) não refletem fielmente a realidade do equipamento de fábrica.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para cumprir com o objetivo principal desta dissertação, foi realizada uma metodologia de estudos dividida em duas partes: em uma primeira etapa, estudou-se, nos corpos-de-prova moldados em laboratório, o comportamento dos concretos secos quanto à resistência mecânica, energia e textura com diferentes misturas de agregados, com diferentes massas específicas, variações na umidade, além de diversos teores de cimento. Para este estudo, teve-se como base uma mistura atualmente empregada por uma fábrica produtora de PCP de 50MPa da grande Florianópolis. A partir deste traço, testou-se a variação de algumas variáveis envolvidas a fim de buscar uma otimização do processo como um todo.

As composições mais promissoras dos materiais estudados foram, posteriormente, testadas em fábrica para certificação dos resultados obtidos. Com o resultado desta fase experimental, buscou-se determinar quais as características que uma mistura deve possuir para ser considerada ideal para a fabricação de PCP de 50MPa. É importante salientar que este resultado foi encontrado tanto para os agregados, quanto para um tipo de equipamento disponível na região da grande Florianópolis, podendo apresentar variações de acordo com o equipamento e agregados utilizados.

O estudo dessas variáveis se fez necessário, visto que, através de trabalhos anteriores já realizados pelo grupo Gtec por Oliveira (2004) e

Frasson (2000) para o concreto seco, o simples aumento do consumo de cimento, aumenta a resistência à compressão das peças até um determinado ponto. Depois disso, o incremento de cimento não influencia mais na resistência mecânica das PCP (fato este comprovado mais adiante neste trabalho).

Buscou-se, portanto, além de entender este fenômeno, verificar a influência de outras variáveis envolvidas, com a finalidade de alcançar, com precisão e rapidez, a resistência à compressão de 50MPa, estabelecida por norma.

Em uma segunda etapa, compararam-se as resistências dos corpos-de-prova moldados em laboratório com as PCP produzidas na própria fábrica, visando atestar a existência de uma relação confiável entre as mesmas para o nível de resistência pretendido. O objetivo de se comprovar esta relação é possibilitar a realização de futuros trabalhos em laboratório com confiabilidade nos resultados adquiridos, sendo viável estimar a resistência à compressão das PCP com mesma composição, tornando-se, assim, o processo mais fácil e menos oneroso do que os atualmente realizados.

Por último, foi feito um estudo de caráter econômico, comparando os resultados encontrados.

5.2 VARIÁVEIS ESTUDADAS

De acordo com o item 1.1, este trabalho tem como objetivo principal estudar a influência das diversas variáveis envolvidas no processo produtivo de PCP de 50MPa, a fim de se obter uma mistura que proporcione maior resistência à compressão, menores custos, e uma menor energia de compactação. Estudou-se a influência de diferentes insumos, na resistência mecânica, na textura e na energia, necessários para a moldagem destas peças. Para alcançar este objetivo, foram definidas as seguintes variáveis de estudo:

- **Umidade:** uma das razões mais frequentes de variabilidade na compacidade de PCP é a umidade. A variação de umidade interfere na eficiência da compactação, na alimentação das formas, além de modificar as características do concreto. Quantidades de água acima do necessário podem resultar em aderência das peças nas sapatas, gerando fissuras nas mesmas, além de perda na produtividade, visto a necessidade de paradas constantes para a limpeza das sapatas. Por outro lado, misturas muito secas, apesar de facilitar a alimentação das

formas, geram dificuldade de prensagem das peças, fazendo com que, muitas vezes, o operador da máquina reduza o tempo de alimentação para poder prensar as peças, produzindo, então, peças mais leves e, conseqüentemente, menos resistentes. É importante ratificar que, diferentemente do concreto plástico, a quantidade de água adicionada ao concreto seco deve ser a máxima possível, desde que se garantam a trabalhabilidade adequada das peças. Isto porque quanto maior a quantidade de água empregada, maior a lubrificação entre as frações do concreto, como, também, a facilidade de compactação, deixando-o menos poroso e, conseqüentemente, mais resistente. Para cada mistura e tipo de equipamento, existe um teor ótimo de água, chamado de umidade ótima.

Neste trabalho, a umidade ótima foi definida, conforme descrito no item 4.2. Após a determinação desta umidade ótima, passou-se a adotá-la e, também, 0,5% acima dela para cada uma das misturas, ou seja, foram estudados dois teores de umidade para cada mistura.

• **Traço:** outro fator que influencia na resistência à compressão das peças, é o teor de cimento. Este teor depende do equipamento empregado, sendo que, via de regra, para equipamentos com menor energia de compactação, deve-se empregar traços mais ricos, assim como para máquinas de maior energia de compactação, pode-se empregar traços mais pobres. Porém, é importante ressaltar, como já exposto neste trabalho anteriormente, que o simples aumento no consumo de cimento, muitas vezes, não significa aumento na resistência do concreto.

Nesta pesquisa, para cada série moldada, foram empregados três traços com consumos de cimento distintos, 1:3, 1:3,5 e 1:4. O traço 1:4,0 é consagrado regionalmente e os outros dois mais ricos que o primeiro foram adotados, tendo em vista a dificuldade das fábricas em se alcançar a resistência à compressão de 50MPa, preconizada pela norma NBR 9781.

• **Teor de sólidos:** porcentagem de volume de sólidos é a relação entre o volume de material sólido na mistura (cimento e agregados) pelo volume do concreto. Optou-se por trabalhar na primeira etapa do estudo (em laboratório) com teor de sólidos e não com massa específica do concreto, pois seriam realizadas misturas com agregados de diferentes massas específicas. Para o universo de combinações das misturas estudadas em laboratório, adotaram-se dois teores de sólidos: 79% e 80%. Estes valores foram obtidos a partir de resultados de trabalhos

anteriores realizados em fábricas com tipos distintos de equipamentos de vibro-compressão. Os teores de sólidos empregados são proporcionais às massas específicas compatíveis com o alcance da resistência a compressão de 50MPa (em torno de 2,30 a 2,35g/cm³). Já na etapa realizada em fábrica, trabalhou-se com massas específicas, pois a forma de controle na produção é o peso das peças. Mesmo sabendo-se que é possível se determinar o teor de sólidos com o peso das peças, entende-se que é muito mais fácil e rápido relacionar o peso com a massa específica, visto que, em fábrica o controle da umidade das PCP não é tão rigoroso quanto em laboratório.

• **Teor de pedrisco:** o agregado graúdo desempenha um importante papel na resistência do concreto. Deve-se empregar a maior quantidade possível de agregado graúdo, desde que não prejudique a aparência das peças, ou seja, que o concreto não fique “empedrado”. Portanto, para este trabalho, foram definidos três teores de pedrisco, 16%, 20% e 24%. Da mesma forma que o traço, foi estabelecido um valor consagrado nas fábricas da região (16%) e a partir deste, aumentou-se o teor, visto que, conforme exposto anteriormente, geralmente quanto maior a quantidade de agregado graúdo, maior a resistência mecânica da peça.

• **Tipo de areia grossa:** o agregado miúdo é um constituinte extremamente importante na composição do concreto, visto que a qualidade do concreto está intimamente ligada à qualidade dos agregados utilizados. Por sua vez, a qualidade dos agregados miúdos está associada a diversos fatores como forma do grão, origem mineralógica, teor de pulverulento, entre outros. As areias naturais eram utilizadas até bem pouco tempo atrás, como única opção de agregado miúdo. Porém, por motivos ambientais e econômicos, observa-se, cada vez mais, a utilização de areias de britagem em substituição parcial e, às vezes, até total das areias naturais. Neste trabalho, foi estudada a substituição parcial de areia natural de cava por areia de britagem. Foram empregados para o estudo, três tipo de areia: areia natural grossa, areia natural fina e areia de britagem. Estas areias foram utilizadas em composições de areia natural fina + areia natural grossa (1) e areia natural fina + areia de britagem (2).

• **Teor de areia fina:** a proporção ideal entre agregados miúdos para PCP é aquela que resulta em menor energia de compactação e a

uma melhor textura (fechada). Esta textura fechada está relacionada a um melhor empacotamento dos grãos, tornando o concreto mais compacto (menor volume de vazios) e, conseqüentemente, mais resistente. Para este trabalho, foram utilizadas duas proporções de areias, sendo que estas proporções foram determinadas a partir de resultados obtidos anteriormente. Tanto para as areias naturais quanto para a areia de britagem, as composições foram as seguintes: (1) 20% de areia natural fina + 80% areia natural grossa, (2) 30% de areia natural fina + 70% areia natural grossa, (3) 20% areia natural fina + 80% areia de britagem e (4) 30% areia natural fina + 70% areia de britagem.

Estas foram as variáveis escolhidas para serem avaliadas durante os ensaios em laboratório, visto que são elas as que causam maior influência na resistência mecânica das PCP, além de influenciar, também, em outras características importantes como energia de compactação, textura e coesão.

5.3 MATERIAIS EMPREGADOS

5.3.1 Cimento

Em todo o programa experimental, foi utilizado o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial resistente a sulfatos (CPV ARI RS), cimento comumente empregado nas indústrias de artefatos da região. As características físicas, químicas e mecânicas deste cimento são apresentadas na tabela 6. Esta caracterização foi fornecida pelo próprio fabricante do produto.

Para os ensaios realizados em laboratório foram empregados cimento em sacos de 50kg. O armazenamento deste cimento foi feito utilizando sacos plásticos vedados, além de tambores plásticos devidamente tampados. Para as misturas na fábrica foi utilizado cimento a granel.

Tabela 6: Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CPV ARI RS.

Ensaio Químico - RX - Método de Ensaio NBR14656/01	NBR	Un.	Média	Máximo	Mínimo
Perda ao fogo - PF	NM18/04	%	3,54	3,79	3,10
Óxido de Magnésio - MgO	NM14/04	%	5,66	5,93	5,42
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	NM16/04	%	3,05	3,27	2,60
Anidrido Carbônico - CO ₂	NM20/04	%	2,56	2,79	2,22
Resíduo Insolúvel - RI	NM22/05	%	13,60	17,94	10,32
Equivalente Alcalino em Na ₂ O*	-	%	0,73		

* (0,658 x K₂O% + Na₂O%)

Ensaio Mecânicos - Resistência à Compressão (MPa) - NBR7215/96				
Idade (Dias)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio
1	22,0	24,0	22,6	0,6
3	31,3	34,4	33,1	0,8
7	36,4	40,9	38,1	1,0
28	45,3	48,3	46,5	0,7

Ensaio Físicos	NBR	Un.	Média	Máximo	Mínimo
Área específica (Blaine)	NM76/98	m ² /kg	500	518	479,00
Massa específica	NM23/01	g/cm ³	2,98	-	-
Resíduo na Peneira 0,075mm (#200)	11579/91	%	0,10	0,10	0,10
Resíduo na Peneira 0,044mm (#325)	12826/93	%	1,10	1,50	0,80
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/02	%	29,20	31,20	28,50
Início de Pega	NM65/03	min	210	220	180,00
Fim de Pega	NM65/03	min	283	295	250
Expansibilidade Le Chatelier - a Quente	11582/91	mm	0,43	1,00	0,00

Fonte: Organizado pela autora, utilizando a caracterização fornecida pelo próprio fabricante do produto.

5.3.2 Água

A água utilizada, tanto para os estudos realizados no laboratório LMCC-UFSC, como em fábrica, era oriunda da rede de abastecimento da cidade.

5.3.3 Aditivo

Neste trabalho, tanto na etapa de estudos laboratoriais quanto em fábrica foi empregado um aditivo incorporador de ar líquido (que atua como plastificante para concretos de consistência seca), isento de cloretos. Este aditivo, quando diluído com a água de amassamento do concreto, proporciona maior plasticidade e redução de água. É empregado em larga escala na fabricação de produtos com concreto seco. Em laboratório, foi utilizado este aditivo produzido pela empresa Rheoset, chamado de Rheo Cast, enquanto que, na fábrica, foi empregado um produzido pela empresa Camargo Química, chamado de Press Mix. Apesar de serem aditivos de fabricantes distintos, eles possuíam as mesmas características e funções.

Em ambas as etapas a quantidade de aditivo utilizada foi a recomendada pelo fabricante: 0,3% da massa de cimento empregada.

5.3.4 Agregados

Os agregados miúdos empregados, para este estudo, em concreto seco foram: duas areias naturais (grossa e fina) provenientes, respectivamente, dos municípios de Tijucas e Palhoça, além de uma areia de britagem proveniente de um britador tipo VSI, de uma empresa de Palhoça. Esta areia de britagem foi estudada com e sem material pulverulento, para a avaliação da influência do mesmo na mistura. Como agregado graúdo foi utilizado um pedrisco granítico (brita “0”) procedente do município de Palhoça.

A composição granulométrica, módulo de finura, porcentagem de material pulverulento e a massa específica dos referidos agregados apresentam-se nas Tabelas 7 e 8, e figura 18. respectivamente.

Tabela 7: Composição granulométrica e módulo de finura dos agregados utilizados.

# (mm)	% retidas acumuladas				
	Areia Natural Fina (AN1)	Areia Natural Grossa (AN2)	Areia Britagem não lavada (AB1)	Areia Britagem lavada (AB2)	Pedrisco
9,5	0	0	0	0	2
6,3	0	0	0	0	39
4,8	0	1	0	0	77
2,4	0	14	16	16	99
1,2	2	51	44	45	100
0,6	4	75	60	64	100
0,3	12	88	73	79	100
0,15	84	95	83	91	100
0,075	99	98	89	97	100
Fundo	100	100	100	100	100
MF	1,028	3,236	2,764	2,960	5,764

Tabela 8: Massa específica e material pulverulento dos agregados utilizados.

Materiais	Massa Específica kg/dm ³	Material Pulverulento %
Areia Natural Fina	2,645	1
Areia Natural Grossa	2,612	2,55
Areia Britagem não lavada	2,733	14,4
Areia Britagem lavada	2,726	1,54
Pedrisco	2,652	0,29

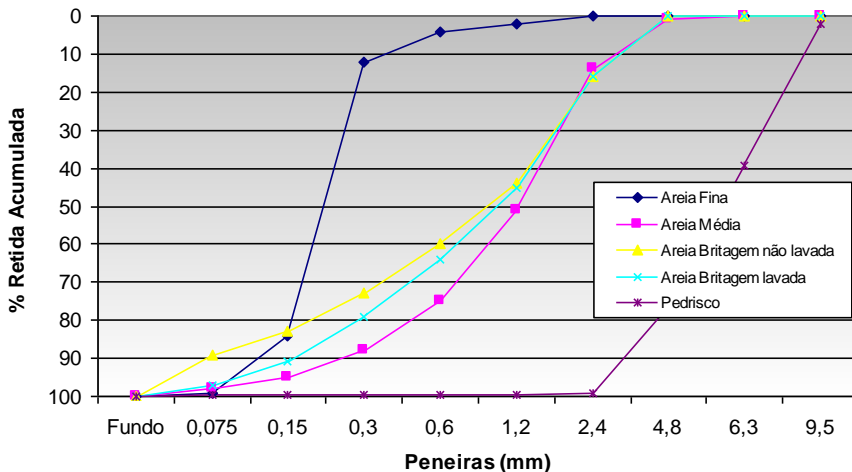


Figura 18: Curvas granulométricas dos agregados utilizados.

5.4 METODOLOGIA

Descrevem-se, a seguir, a metodologia empregada neste trabalho, tanto no estudo em laboratório, quanto no estudo realizado em fábrica.

5.4.1 Estudo em laboratório

Relata-se, aqui, o estudo feito em laboratório, ou seja: a determinação da umidade ótima, os traços utilizados no estudo e os equipamentos e procedimentos usados para a confecção dos corpos-de-prova 9x8cm.

5.4.1.1 Determinação da umidade ótima

A análise da quantidade de água ideal para uma mistura em concreto seco deve levar em conta três parâmetros principais: resistência à compressão, energia de compactação e textura superficial da peça. Com o objetivo de avaliar a umidade ótima para cada mistura durante a sequência de moldagem dos corpos-de-prova, foi feito um estudo preliminar.

Neste estudo preliminar, foram moldados corpos-de-prova 9x8cm, com um traço padrão¹, variando-se apenas a umidade. Foi avaliada visualmente, através do ponto de pelota, a umidade da mistura e, após, moldadas as condições superficiais dos corpos-de-prova. Depois de 28 dias, estes corpos-de-prova foram ensaiados à compressão e os resultados de resistência e energia estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados de resistência a compressão e energia de compactação dos corpos-de-prova.

CPs	Umidade	Carga (kN)	Resistência (Mpa)	Resist. Méd. (Mpa)	E (J)
1	6,5	211,0	33,2	30,2	288,0
2	6,5	192,5	30,3		300,0
3	6,5	173,0	27,2		336,0
1	7,0	286,0	45,0	42,2	216,0
2	7,0	278,50	43,8		264,0
3	7,0	240,00	37,7		264,0
1	7,5	360,00	56,6	52,76	120,0
2	7,5	337,00	53,0		120,0
3	7,5	310,00	48,7		144,0
1	8,0	372,5	58,6	55,67	96,0
2	8,0	350,5	55,1		96,0
3	8,0	339,5	53,4		120,0
1	8,5	310,5	48,8	48,60	72,0
2	8,5	296,5	46,6		72,0
3	8,5	320,5	50,4		120,0

Conforme Tabela 9, verificou-se que, com o aumento da umidade, houve uma diminuição da energia de compactação. Além disso, observou-se que a resistência à compressão aumenta até um determinado ponto, considerada umidade ótima e, a partir deste ponto, a

¹ Traço padrão empregado = traço 1:3,5; teor de pedrisco de 20%; areia natural média + areia natural fina na composição 70-30%; d=2,32g/cm³.

resistência começa a decrescer. Na sequência de moldagem dos corpos-de-prova, usou-se como umidade ótima aquela cuja condição superficial do CP era semelhante à mostrada na figura 19, no ponto de umidade ótima.

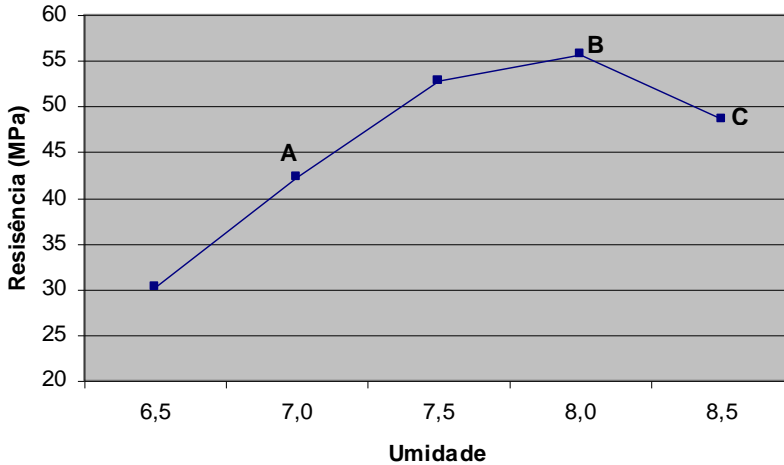


Figura 19: Aspecto da superfície do CP de acordo com ponto na curva de umidade.

a) umidade abaixo da ideal (seca); b) umidade ideal; c) acima da ideal.

5.4.1.2 Traços utilizados no estudo

Para a moldagem dos corpos-de-prova, utilizaram-se dois teores de sólidos. Para cada teor de sólido, foram moldadas duas misturas com umidades distintas: a primeira, utilizando a umidade ótima e a segunda, uma mistura com 0,5% acima da umidade ótima. Estas umidades

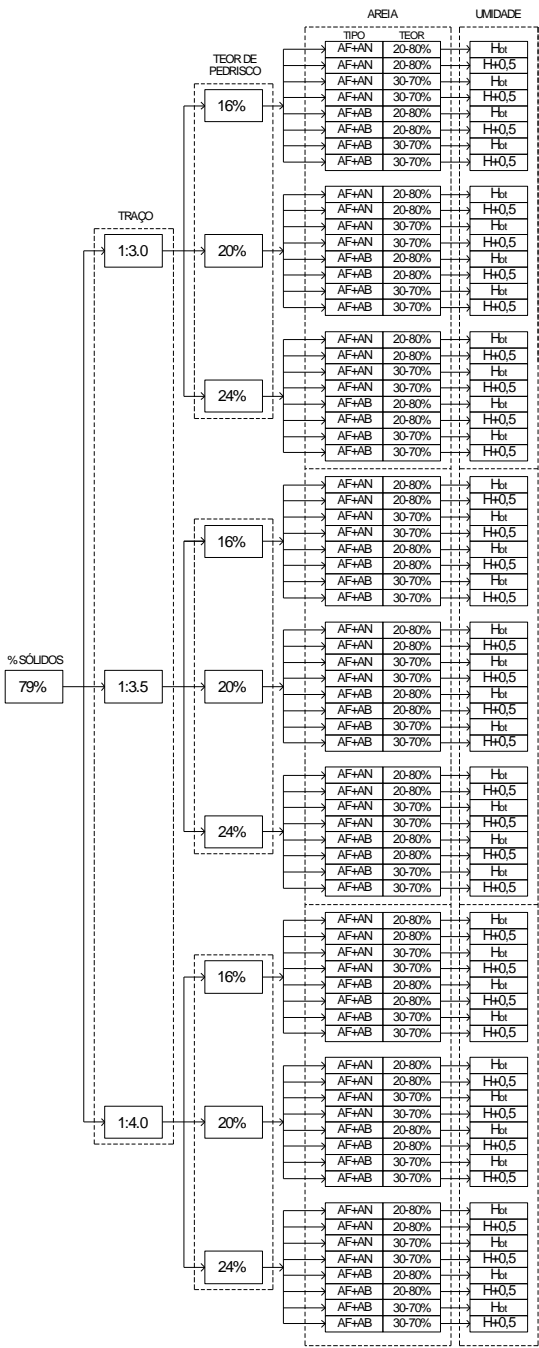
encontradas estão de acordo com valores empregados em fábricas que produzem PCP, valores estes que variam em torno de 6 a 8%.

Em seguida, fixados o teor de sólidos e a umidade, utilizaram-se quatro proporções de agregados miúdos (item 5.2) com o objetivo de avaliar a influência da forma e origem dos grãos nas misturas.

A quantidade de pedrisco adotada também foi analisada, empregando três teores distintos nas misturas (item 5.2).

Finalmente, para cada série moldada, variou-se o consumo de cimento.

Para cada situação (teor sólidos, umidade, teor da areia, tipo de areia, teor de pedrisco e traço) foram moldados três corpos-de-prova, produzindo um total de 432 corpos-de-prova e 144 misturas. Todos estes corpos-de-prova foram ensaiados à compressão e avaliados quanto a energia e textura. A figura 20 apresenta esquematicamente o plano de moldagem dos corpos-de-prova com as combinações descritas acima.



Todos os traços unitários, teores de sólidos e quantidade de material por mistura confeccionada para cada uma das composições estudadas nesta etapa do trabalho, encontram-se apresentados no ANEXO I.

5.4.1.3 Equipamentos e procedimentos para a confecção dos corpos-de-prova 9x8cm

Para a realização dos ensaios em laboratório com os corpos-de-prova 9x8cm, todos os agregados foram secos em estufa por um período mínimo de 18 horas, sendo resfriados em ambiente coberto do laboratório, onde permaneciam até sua pesagem.

Na pesagem dos materiais, estes eram colocados em sacos plásticos vedados e armazenados dentro de uma sala climatizada, onde permaneciam até sua utilização nos ensaios.

O pedrisco e as areias, nas proporções predeterminadas, após pesagem, eram armazenados em um mesmo saco plástico, enquanto que o cimento era armazenado em um saco plástico separado.

A água e o aditivo eram pesados no dia da realização do ensaio, evitando, assim, qualquer variação de peso por evaporação.

Todas as misturas e a moldagem dos corpos-de-prova foram executadas dentro desta sala climatizada.

Após a pesagem e o armazenamento dos materiais, foi feita a mistura dos mesmos. Para a mistura dos materiais constituintes dos corpos-de-prova, foi utilizado um misturador mecânico (argamassadeira), conforme a sequência descrita a seguir:

- Primeiramente eram colocados na cuba todos os materiais secos (cimento e agregados) misturando-os em velocidade baixa por 1 minuto e 30 segundos;

- Após este tempo, desligava-se o misturador para a adição da água com o aditivo;

- Então, com velocidade baixa, deixava-se misturar por mais 1 minuto e 30 segundos.

Finalizado o processo de mistura, realizava-se a moldagem dos corpos-de-prova 9x8cm.

Para cada um dos 432 corpos-de-prova, foi empregado um soquete de compactação, proposto por Oliveira (2004), semelhante ao equipamento de Marshall (para misturas asfálticas) e um molde cilíndrico metálico que possui 90mm de diâmetro e 160mm de altura. É

importante salientar que, para os estudos com soquete de compactação, foi empregada uma altura de queda de 41,5cm, que equivale a 24J.

A sequência de moldagem dos corpos-de-prova em laboratório está apresentada no item 4.3.

O valor da massa dos corpos-de-prova, segundo o método proposto, foi definido anteriormente, de acordo com o teor de sólidos desejado após a compactação.

O desmolde destes corpos-de-prova era feito utilizando uma prensa disponível no laboratório LMCC-UFSC com o objetivo principal de evitar a criação de microfissuras nas peças por um desmolde dinâmico, além de agilizar a operação. Isto porque as peças trabalhadas possuíam um teor de sólidos elevado, dificultando, assim, o desmolde com o próprio soquete, como feito em trabalhos anteriores.



Figura 21: Sequência de desmoldagem dos corpos-de-prova na prensa.

Assim que desmoldados, os corpos-de-prova eram mantidos em câmara úmida até o 12º dia, quando, então, eram retirados para o capeamento com pasta de cimento para regularização da superfície. Este capeamento era feito em dois dias, sendo, no primeiro, o capeamento de uma face e no segundo, o da outra face. No 14º dia, após capeados, os corpos-de-prova eram imersos no tanque de água para saturação até a data do rompimento. Na data de rompimento (28 dias após a moldagem), os corpos-de-prova eram, então, retirados do tanque de água e rompidos para a avaliação da resistência à compressão. A determinação da resistência à compressão foi feita de acordo com o método preconizado pela norma NBR 9780 (1987), numa prensa hidráulica de 200 toneladas, do laboratório LMCC-UFSC.

5.4.2 Estudo em fábrica

O estudo em fábrica teve como objetivo ratificar, em escala de produção, as conclusões obtidas em laboratório.

5.4.2.1 Traços utilizados no estudo

Nesta etapa do estudo, foram feitas comparações de resistências à compressão das PCP produzidas com seus respectivos corpos-de-prova, moldados com a mesma mistura retirada da correia transportadora do equipamento de vibro-compressão, visando determinar uma relação entre eles. Para isso, foram selecionadas as misturas que obtiveram os melhores resultados de resistência a compressão nos corpos-de-prova. Moldaram-se, então, cinco séries de PCP, sendo três delas com areia natural e duas com areia de britagem.

Os traços empregados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Traços empregados na produção dos PCP e suas respectivas séries de corpos-de-prova.

TRAÇO	TRAÇO REFERÊNCIA LABORATÓRIO	Quantidade por virada (Kg)				
		Cimento	Pedrisco	Areia Natural Fina	Areia Natural Grossa	Areia britagem não lavada
Mistura 1	P24 AN20-80 (B) 3,0	200	144	102	390	-
Mistura 2	P24 AN30-70 (B) 3,0	200	144	153	342	-
Mistura 3	P24 AN20-80 (A) 3,5	184	155	110	420	-
Mistura 4	P24 AB30-70 (A) 3,0	200	144	153	-	329
Mistura 5	P24 AB30-70 (A) 3,5	184	155	165	-	354

Obs: As proporções de areia natural grossa e fina e de areia de britagem, na tabela acima, são em massa úmida.

5.4.2.2 Equipamentos e procedimentos para a confecção das PCP

Toda esta parte de moldagem das PCP, assim como a dos seus respectivos corpos-de-prova foram realizadas dentro das instalações de uma empresa de médio porte, fabricante de artefatos de concreto, localizada na região da Grande Florianópolis. O equipamento utilizado no estudo em escala de produção foi uma máquina vibro-prensa Piorotti BlocoPAC 700.

Com a mesma mistura empregada na produção das PCP, foram moldados os corpos-de-prova cilíndricos (9x8cm), utilizando-se o

mesmo soquete de compactação e a sequência de moldagem realizada na etapa laboratorial. Vale salientar que, para cada mistura de PCP, foi moldada uma amostra formada por quatro corpos-de-prova, sendo dois deles, com a massa específica de $2,30\text{kg/dm}^3$ e os outros dois, com massa específica de $2,35\text{kg/dm}^3$. Os corpos-de-prova foram moldados com estas massas específicas, por ser esta a faixa de valores esperados nas PCP com o objetivo de se alcançar a resistência à compressão de 50MPa.

Diferentemente de trabalhos realizados com PCP de 35MPa, neste estudo, trabalhou-se com massa específica verde e não seca, pois, aqui, a massa específica era alta o suficiente para não haver risco de fissuração das peças no manuseio das mesmas. Outro fato importante a ressaltar é que, nesta etapa, foi trabalhado com massa específica e não com porcentagem de volume de sólidos, visto que, em fábrica, o melhor parâmetro de controle de qualidade das peças é o peso das mesmas recém-produzidas, devido à facilidade de determinação e a boa relação com a resistência à compressão obtida. Portanto, com as porcentagens de volume de sólidos trabalhadas em laboratório, sabiam-se, previamente, os valores das massas específicas equivalentes a estas porcentagens. Então, durante o processo produtivo das misturas estudadas, os equipamentos eram regulados a fim de que as PCP alcançassem os pesos mínimos para as massas específicas determinadas.

Entende-se como regulagem do equipamento a definição dos tempos de alimentação e de vibro-compressão do mesmo, que, como visto anteriormente, estão diretamente relacionados com o ciclo de produção das PCP. Observou-se que o primeiro foi praticamente constante em todas as misturas, fato comum no caso de PCP, visto que o tamanho das formas é maior do que a de blocos de concreto (onde as paredes são finas e difíceis de alimentar) e, portanto, de fácil enchimento. Já o tempo de vibro-compressão sofreu bastante alteração de acordo com a mistura empregada, conforme mostrado na Tabela 11. Nota-se que este tempo de vibro-compressão do equipamento está intimamente relacionado com a energia empregada para compactação dos corpos-de-prova na etapa laboratorial. Fato este comprovado de acordo com os resultados obtidos em ambas as etapas.

Tabela 11: Tempos médios de vibro-compressão na produção das PCP com as misturas estudadas

TRAÇO	Tempo de vibro-compressão (s)
Mistura 1	4,50
Mistura 2	4,70
Mistura 3	4,50
Mistura 4	10,00
Mistura 5	5,50

Como se entende que, nesta etapa em fábrica, assim como a mistura, o equipamento é outro fator preponderante nos resultados de resistência à compressão das peças, além da regulagem dos tempos também se atentou para outros itens relacionados ao equipamento, como a distribuição dos pesos das peças nas chapas. A Figura 22 mostra a posição das PCP em uma chapa. A numeração é feita da esquerda para a direita e de frente pra trás na saída da chapa da produção (vista frontal da máquina).

6	7	8	9	10
1	2	3	4	5

Frente do equipamento

Figura 22: Posição das PCP na chapa.

Sabe-se, através de trabalhos anteriores realizados pelo grupo GTEC-UFSC, que pode ocorrer variabilidade do peso das PCP no decorrer de uma produção. Esta variabilidade ocorre em função da falta de ajuste nos tempos de alimentação e regulagens adequadas das gavetas, da mesa vibratória ou da mesa de apoio das chapas. O controle periódico da distribuição de pesos das peças por chapa, efetuando, quando necessário, as devidas regulagens do equipamento, produz peças

com menor variabilidade e consequentemente com maior qualidade. Portanto, este foi um fator controlado durante o estudo feito na fábrica. Observou-se que, de fato, houve esta variação no peso das peças (Tabela 12), porém, para as misturas estudadas, esta variação estava dentro da variação máxima permissível (5% em relação ao peso médio dos pavimentos).

Tabela 12: Pesagem das PCP em diversas chapas para detecção do problema de variação massa das mesmas.

Chapa/ Posição	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	M5 (g)	Média	Desvio padrão
1	4.670	4.548	4.736	4.648	4.590	4.638,40	72,68
2	4.512	4.428	4.510	4.566	4.452	4.493,60	54,51
3	4.462	4.364	4.466	4.542	4.432	4.453,20	64,29
4	4.364	4.334	4.420	4.594	4.442	4.430,80	100,88
5	4.406	4.386	4.472	4.686	4.572	4.504,40	124,80
6	4.624	4.502	4.552	4.470	4.474	4.524,40	64,58
7	4.558	4.474	4.464	4.338	4.402	4.447,20	82,53
8	4.450	4.458	4.442	4.324	4.434	4.421,60	55,29
9	4.342	4.350	4.346	4.264	4.430	4.346,40	58,76
10	4.308	4.426	4.298	4.390	4.418	4.368,00	60,93
Média	4.469,60	4.427,00	4.470,60	4.482,20	4.464,60	-	-
Desvio padrão	120,94	69,65	118,97	146,90	64,38	-	-

Por fim, durante o processo produtivo das PCP, além da regulação dos tempos (de alimentação e vibro-compressão), da distribuição dos pesos das peças nas chapas, um terceiro item foi verificado: a umidade das misturas.

Como citado anteriormente, recomenda-se que, para o concreto seco, seja adicionada a maior quantidade de água possível às misturas, desde que não prejudique a produção das peças. Uma mistura com excesso de água provoca aderência das peças nas sapatas do equipamento de vibro-compressão, por outro lado, misturas secas geram dificuldade de compactação, produzindo, geralmente, peças mais leves e menos resistentes por ser necessário reduzir o tempo de alimentação.

Portanto, o acompanhamento da umidade das misturas e das peças produzidas por elas foi de fundamental importância para a garantia da produção de peças com qualidade e com resistências a compressão exigida.

A umidade, nesta fase (em fábrica) foi controlada de duas formas: através da avaliação empírica denominada “ponto de pelota” (conforme descrito no item 4.2) quando ainda estava no misturador. E, em seguida, observando-se as peças recém produzidas. Um indicativo de que a umidade encontrava-se dentro da faixa ideal era o aparecimento de ranhuras, devido à nata de cimento, na lateral das peças, logo após a etapa de desforma das mesmas (Figura 23).



Figura 23: Detalhe, quanto à umidade ideal, da lateral de uma PCP recém produzida.

Após a realização de todos estes ajustes, durante a produção das PCP, foram retiradas amostras do concreto que abastecia a máquina para a moldagem dos seus respectivos corpos-de-prova cilíndricos 9 x 8cm.

Cerca de 30 PCP, com diferentes pesos (de diferentes posições nas chapas), foram separadas após saírem da câmara de cura a vapor. A cura das peças produzidas pelas misturas estudadas se dava da seguinte forma: duas horas de espera com a câmara fechada, porém sem o vapor; depois duas a três horas de aplicação do vapor, com a temperatura média dentro da câmara de 60°C, e, finalmente, em torno de uma hora com a câmara aberta para o resfriamento das peças.

Em seguida, cerca de 24 horas após a moldagem, as PCP e os corpos-de-prova produzidos eram identificados e levados para o laboratório LMCC-UFSC, onde os ensaios seriam realizados. Dentre as 30 PCP separadas anteriormente, eram selecionadas cerca de 15 peças. A seleção foi feita da seguinte forma: inicialmente, definiam-se quais eram as peças mais leves e as mais pesadas dentre as disponíveis.

Definidos esses dois extremos, eram selecionadas as demais peças de modo a se obter uma faixa de pesos bem distribuídos. Além da pesagem, eram medidas as alturas da PCP e determinado o volume das mesmas. O volume médio das peças foi encontrado usando o ensaio da caixa metálica com água proposto por Frasson (2000). Neste ensaio, as PCP, previamente saturadas, eram submersas numa caixa metálica. Esta submersão das PCP provocava a saída da água pelo extravassor (Figura 24-e). A água que vazava da caixa era despejada num recipiente e, depois que toda ela tivesse vazado, pesava-se o recipiente com água para obtenção de seu volume (Figura Figura 24-f). Considerando a massa específica da água aproximadamente igual a 1 kg/dm^3 , assume-se que a massa de água deslocada é igual ao volume das peças dentro da caixa. E o volume médio das peças é igual ao volume encontrado dividido pela quantidade de PCP dentro da caixa.

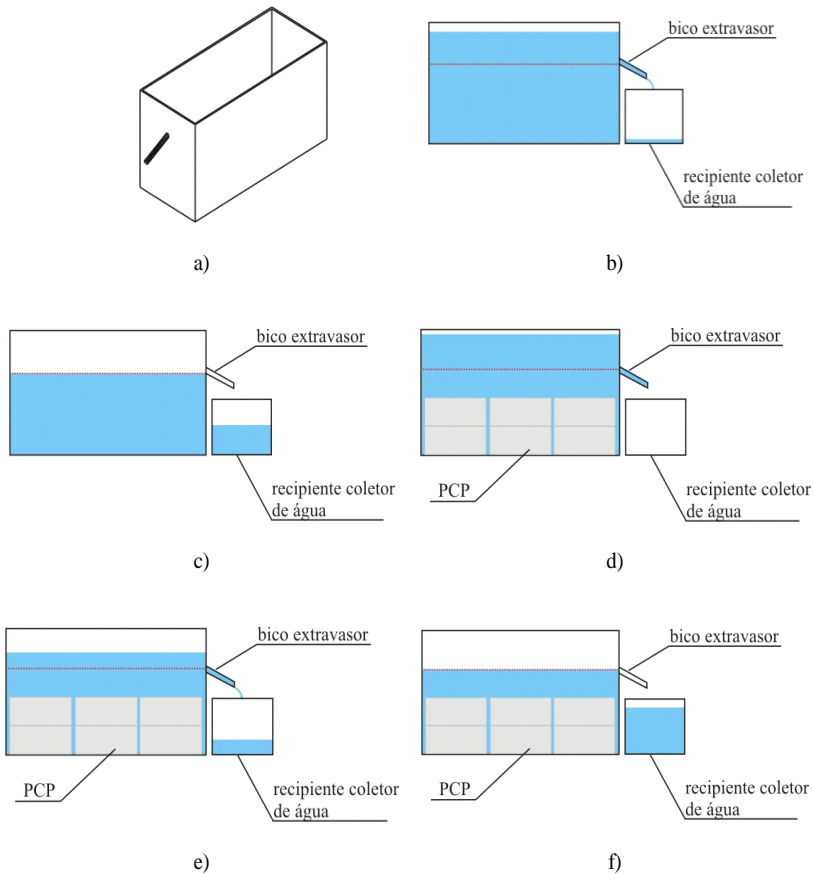


Figura 24: Determinação do volume médio das PCP (OLIVEIRA, 2004).

Tendo o volume médio das peças e a altura média das mesmas (média das alturas das peças colocadas dentro da caixa) é possível encontrar a área média, através da seguinte expressão:

$$\text{área média PCP} = \frac{\text{volume médio}}{\text{altura média}}$$

A massa específica das PCP poderá ser determinada empregando a expressão:

$$massa\ específica_{PCP} = \frac{massa_{PCP}}{área\ média_{PCP} \times altura_{PCP}}$$

Após pesadas e identificadas, as PCP e seus respectivos corpos-de-prova eram colocados em um tanque com água e cal, onde permaneciam por um período de 12 dias. No 12º dia, as peças eram retiradas e capeadas com nata de cimento, sobre uma pedra de granito perfeitamente nivelada, para a eliminação de eventuais imperfeições que pudessem comprometer o ensaio de resistência à compressão. Da mesma forma que na primeira etapa, este capeamento era realizado em dois dias, sendo no primeiro dia, o capeamento de uma face e, no segundo dia, o da outra face. Ao término do capeamento, todas as peças eram colocadas novamente na água, onde permaneciam até a data de ensaio de resistência a compressão (28 dias após a moldagem).

Como na etapa laboratorial, o ensaio de resistência à compressão, tanto das PCP quanto dos corpos-de-prova cilíndricos 9x8cm, foi realizado em uma prensa hidráulica de 200 toneladas, do laboratório LMCC-UFSC, segundo as recomendações da NBR9780 (1987).

5.4.2.3 Processo de lavação da areia de britagem

Diante de alguns problemas apresentados nos resultados obtidos com a areia de britagem não lavada, decidiu-se remover uma fração de seu material pulverulento. O procedimento de remoção do pulverulento foi feito a úmido com a lavação da areia de britagem dentro de uma betoneira de eixo inclinado. A sequência adotada foi a seguinte:

- Adicionavam-se areia de britagem e água dentro da betoneira de eixo inclinado. Na primeira rodada, a proporção era de três baldes de areia e cinco baldes de água. Essa proporção foi feita de acordo com a capacidade da cuba da betoneira (Figura 25-b);
- Ligava-se, então, a betoneira, agitando a mistura por 30 segundos;
- Em seguida, vertia-se a água com parte do material em suspensão, ou seja, água mais material pulverulento (Figura 25-c);
- Nova quantidade de água era adicionada, repetindo-se o processo da primeira rodada. No total, foram feitas cinco rodadas. É

importante lembrar que a partir da segunda, diminuía-se a quantidade de água para três baldes, isto porque a areia lavada ocupava um volume maior dentro da betoneira, não sendo possível adicionar a mesma quantidade da primeira rodada;

- No final das cinco rodadas, a areia lavada era armazenada em um recipiente plástico e seca à temperatura ambiente.



a)



b)



c)



d)

Figura 25: Procedimento adotado para a lavagem da areia de britagem
a) areia a ser lavada; b) retirada da água com pulverulento da betoneira; c) Repetição do processo até cor da água ficar clara; d) Detalhes das areias de britagem não lavada e da lavada.

Ao final deste processo de lavagem da areia, obteve-se um agregado com teor de material pulverulento de 1,54%, teor este que anteriormente era de 14,4%. Esta areia lavada foi empregada em substituição da areia de britagem não lavada das misturas 4 e 5, formando duas novas misturas, denominadas respectivamente, mistura lavada 4 e mistura lavada 5. Com estas duas novas misturas, foi possível avaliar-se a influência do teor de material pulverulento no desempenho das PCP produzidas. Os resultados obtidos encontram-se no item 6.2 e as Tabelas completas com os resultados de resistência à compressão estão no ANEXO III.

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas duas etapas do programa experimental descrito. Primeiramente, são apresentados os resultados obtidos na etapa laboratorial. Em seguida, são apresentados os resultados alcançados na produção de PCP com a utilização de equipamentos de vibro-compressão em fábrica. Por fim, é feita uma análise dos resultados obtidos nas duas fases do estudo, em corpos-de-prova e em PCP.

Ainda neste capítulo, além dos resultados dos ensaios propriamente ditos, também será apresentado um estudo de caráter econômico entre as misturas utilizadas no estudo em fábrica.

6.1 ESTUDO EM LABORATÓRIO

Apresentam-se, a seguir, os resultados do estudo obtidos na etapa laboratorial.

6.1.1 Resistência à compressão, textura e energia

As Tabelas 13, 14 e 15 apresentam, de forma sintetizada, os resultados de resistência à compressão, de textura e de energia de compactação dos corpos-de-prova 9x8cm ensaiados na primeira parte deste programa experimental. Os resultados completos desta etapa do trabalho encontram-se no ANEXO II.

Para a identificação das misturas empregadas, utilizou-se uma nomenclatura conforme a seguir:

- P16 = teor de pedrisco de 16%
- P20 = teor de pedrisco de 20%
- P24 = teor de pedrisco de 24%
- AN = areia natural
- AB = areia de britagem
- 20-80 = teor de areia (20% de areia natural fina + 80% areia natural grossa ou de britagem)
- 30-70 = teor de areia (30% de areia natural fina + 70% areia natural grossa ou de britagem)
- A = teor de sólidos de 80%
- B = teor de sólidos de 79%
- 3,0 = traço 1:3,0
- 3,5 = traço 1:3,5
- 4,0 = traço 1:4,0

Tabela 13: Resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova.

Nº	CPs	%sol. Teórico	% sol. Real	Resistência Potencial (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	Nº	CPs	%sol. Teórico	% sol. Real	Resistência Potencial (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)
1	P16 AN20-80 (A) 3,0	80	79,29	57,3	3,4	6,2	13	P16 AB20-80 (A) 3,0	80	79,39	60,4	1,3	2,1
	P16 AN20-80 (A) 3,5	80	79,29	57,1	4,3	8,3		P16 AB20-80 (A) 3,5	80	79,47	56,5	2,7	5,0
	P16 AN20-80 (A) 4,0	80	79,32	54,2	5,3	11,1		P16 AB20-80 (A) 4,0	80	79,33	50,8	2,0	4,0
2	P16 AN20-80 (B) 3,0	79	78,65	53,9	3,0	5,9	14	P16 AB20-80 (B) 3,0	79	78,39	59,7	2,0	3,5
	P16 AN20-80 (B) 3,5	79	78,05	53,4	4,5	9,3		P16 AB20-80 (B) 3,5	79	78,76	55,2	0,7	1,4
	P16 AN20-80 (B) 4,0	79	78,98	51,6	2,8	5,6		P16 AB20-80 (B) 4,0	79	78,74	52,2	1,4	2,8
3	P16 AN30-70 (A) 3,0	80	79,04	56,0	3,3	6,3	15	P16 AB30-70 (A) 3,0	80	79,15	61,4	3,8	6,5
	P16 AN30-70 (A) 3,5	80	78,82	57,3	0,4	0,7		P16 AB30-70 (A) 3,5	80	79,59	57,5	1,1	1,9
	P16 AN30-70 (A) 4,0	80	78,74	47,0	5,4	13,1		P16 AB30-70 (A) 4,0	80	79,61	54,4	3,8	7,5
4	P16 AN30-70 (B) 3,0	79	78,63	53,2	2,5	5,0	16	P16 AB30-70 (B) 3,0	79	78,31	60,8	2,2	3,6
	P16 AN30-70 (B) 3,5	79	78,16	53,9	3,6	7,1		P16 AB30-70 (B) 3,5	79	78,47	54,6	2,2	4,2
	P16 AN30-70 (B) 4,0	79	78,61	49,9	2,6	5,6		P16 AB30-70 (B) 4,0	79	78,77	53,8	1,2	2,3
5	P20 AN20-80 (A) 3,0	80	79,12	63,0	2,5	4,2	17	P20 AB20-80 (A) 3,0	80	79,37	62,2	2,1	3,6
	P20 AN20-80 (A) 3,5	80	79,79	61,9	4,3	7,6		P20 AB20-80 (A) 3,5	80	79,16	55,3	0,5	0,9
	P20 AN20-80 (A) 4,0	80	80,54	59,3	3,2	5,7		P20 AB20-80 (A) 4,0	80	79,43	54,5	1,2	2,3
6	P20 AN20-80 (B) 3,0	79	78,45	59,7	3,5	6,2	18	P20 AB20-80 (B) 3,0	79	78,74	55,1	0,1	0,2
	P20 AN20-80 (B) 3,5	79	78,76	60,6	3,5	6,2		P20 AB20-80 (B) 3,5	79	78,72	55,7	1,9	3,6
	P20 AN20-80 (B) 4,0	79	78,48	53,3	2,5	5,0		P20 AB20-80 (B) 4,0	79	78,69	52,0	2,7	5,5
7	P20 AN30-70 (A) 3,0	80	79,15	62,1	1,0	1,7	19	P20 AB30-70 (A) 3,0	80	78,47	54,6	3,8	7,6
	P20 AN30-70 (A) 3,5	80	79,57	59,6	0,6	0,9		P20 AB30-70 (A) 3,5	80	79,25	57,8	1,6	2,9
	P20 AN30-70 (A) 4,0	80	79,16	56,4	2,9	5,3		P20 AB30-70 (A) 4,0	80	79,55	54,9	5,4	10,7
8	P20 AN30-70 (B) 3,0	79	78,24	60,4	3,8	6,5	20	P20 AB30-70 (B) 3,0	79	78,8	62,2	3,6	6,3
	P20 AN30-70 (B) 3,5	79	78,69	59,3	3,4	6,2		P20 AB30-70 (B) 3,5	79	78,43	57,2	0,7	1,2
	P20 AN30-70 (B) 4,0	79	78,61	53,2	5,4	11,5		P20 AB30-70 (B) 4,0	79	78,3	51,4	2,0	4,0
9	P24 AN20-80 (A) 3,0	80	79,59	68,2	3,5	5,4	21	P24 AB20-80 (A) 3,0	80	79,44	64,6	0,7	1,1
	P24 AN20-80 (A) 3,5	80	79,83	63,3	3,2	5,2		P24 AB20-80 (A) 3,5	80	80,12	58,1	4,2	7,9
	P24 AN20-80 (A) 4,0	80	79,96	60,9	1,2	2,1		P24 AB20-80 (A) 4,0	80	79,44	56,0	1,1	2,0
10	P24 AN20-80 (B) 3,0	79	79,15	68,6	5,2	8,3	22	P24 AB20-80 (B) 3,0	79	79,21	65,6	2,7	4,4
	P24 AN20-80 (B) 3,5	79	79,01	56,6	2,7	4,9		P24 AB20-80 (B) 3,5	79	79,03	57,6	0,6	1,1
	P24 AN20-80 (B) 4,0	79	78,4	53,1	3,9	7,8		P24 AB20-80 (B) 4,0	79	79,03	53,8	0,6	1,2
11	P24 AN30-70 (A) 3,0	80	79,34	63,7	2,0	3,2	23	P24 AB30-70 (A) 3,0	80	79,79	66,6	2,1	3,3
	P24 AN30-70 (A) 3,5	80	79,61	56,0	1,9	3,4		P24 AB30-70 (A) 3,5	80	79,58	62,7	3,7	6,3
	P24 AN30-70 (A) 4,0	80	80,22	50,3	0,9	1,9		P24 AB30-70 (A) 4,0	80	79,43	58,7	2,5	4,4
12	P24 AN30-70 (B) 3,0	79	79,62	65,9	4,0	6,5	24	P24 AB30-70 (B) 3,0	79	78,89	66,5	1,7	2,7
	P24 AN30-70 (B) 3,5	79	79,39	58,2	2,7	4,8		P24 AB30-70 (B) 3,5	79	78,83	59,3	3,4	6,1
	P24 AN30-70 (B) 4,0	79	78,54	50,0	1,1	2,3		P24 AB30-70 (B) 4,0	79	78,91	54,2	1,9	3,6

Tabela 14: Resultados de textura dos corpos-

Nº	CPs	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. CP	Nº	CPs	%sol. Teórico	%sol. Real	Aparência CP	Textura superficial
1	P16 AN20-80 (A) 3,0	80	79,29	OK	13	P16 AE20-80 (A) 3,0	80	79,39	OK	berm fecho da
	P16 AN20-80 (A) 3,5	80	79,29	+ umida		P16 AE20-80 (A) 3,5	80	79,47	OK	berm fecho da
	P16 AN20-80 (A) 4,0	80	79,32	++ umida		P16 AE20-80 (A) 4,0	80	79,33	OK	berm fecho da
	P16 AN20-80 (B) 3,0	79	78,65	+ umida		P16 AE20-80 (B) 3,0	79	78,39	OK	berm fecho da
2	P16 AN20-80 (B) 3,5	79	78,05	+ umida	14	P16 AE20-80 (B) 3,5	79	78,76	OK	berm fecho da
	P16 AN20-80 (B) 4,0	79	78,98	++ umida		P16 AE20-80 (B) 4,0	79	78,74	OK	berm fecho da
	P16 AN20-80 (A) 3,0	80	79,04	+ umida		P16 AE20-80 (A) 3,0	80	79,15	OK	berm fecho da
	P16 AN20-80 (A) 3,5	80	78,82	OK		P16 AE20-80 (A) 3,5	80	79,59	+ umida	berm fecho da
3	P16 AN30-70 (A) 4,0	80	78,74	OK	15	P16 AE30-70 (A) 4,0	80	79,61	OK	berm fecho da
	P16 AN30-70 (B) 3,0	79	78,63	+ seca		P16 AE30-70 (B) 3,0	79	78,31	+ umida	berm fecho da
	P16 AN30-70 (B) 3,5	79	78,16	+ umida		P16 AE30-70 (B) 3,5	79	78,47	+ umida	berm fecho da
	P16 AN30-70 (A) 3,0	80	79,12	OK		P16 AE30-70 (A) 3,0	80	79,37	+ umida	berm fecho da
4	P16 AN30-70 (A) 4,0	79	78,61	OK	16	P16 AE30-70 (A) 4,0	79	78,77	+ umida	berm fecho da
	P16 AN30-70 (B) 3,5	79	78,16	+ umida		P16 AE30-70 (B) 3,5	79	78,47	+ umida	berm fecho da
	P16 AN30-70 (B) 4,0	79	78,61	+ fecho da		P16 AE30-70 (B) 4,0	79	78,77	+ umida	berm fecho da
	P20 AN20-80 (A) 3,0	80	79,79	OK	17	P20 AE20-80 (A) 3,0	80	79,16	+ umida	berm fecho da
5	P20 AN20-80 (A) 3,5	80	79,79	OK		P20 AE20-80 (A) 3,5	80	79,16	+ umida	berm fecho da
	P20 AN20-80 (A) 4,0	80	80,54	borrachudo		P20 AE20-80 (A) 4,0	80	79,43	OK	berm fecho da
	P20 AN20-80 (B) 3,0	79	78,45	+ umida		P20 AE20-80 (B) 3,0	79	78,74	OK	berm fecho da
6	P20 AN20-80 (B) 3,5	79	78,76	+ umida	18	P20 AE20-80 (B) 3,5	79	78,72	+ seca	berm fecho da
	P20 AN20-80 (A) 4,0	79	78,48	OK		P20 AE20-80 (A) 4,0	79	78,69	OK	berm fecho da
	P20 AN30-70 (A) 3,0	80	79,15	OK		P20 AE30-70 (A) 3,0	80	78,47	+ umida	berm fecho da
	P20 AN30-70 (A) 3,5	80	79,57	OK		P20 AE30-70 (A) 3,5	80	79,25	OK	berm fecho da
7	P20 AN30-70 (A) 4,0	80	79,16	+ umida	19	P20 AE30-70 (A) 4,0	80	79,55	OK	berm fecho da
	P20 AN30-70 (B) 3,0	79	78,24	+ umida		P20 AE30-70 (B) 3,0	79	78,8	+ umida	berm fecho da
	P20 AN30-70 (B) 3,5	79	78,69	OK		P20 AE30-70 (B) 3,5	79	78,43	+ umida	berm fecho da
	P20 AN30-70 (B) 4,0	79	78,61	OK		P20 AE30-70 (B) 4,0	79	78,3	OK	berm fecho da
8	P24 AN30-70 (A) 3,0	80	79,59	borrachudo	20	P24 AE30-70 (A) 3,0	80	79,44	OK	berm fecho da
	P24 AN20-80 (A) 3,5	80	79,83	OK		P24 AE20-80 (A) 3,5	80	80,12	borrachudo	berm fecho da
	P24 AN20-80 (A) 4,0	80	79,96	borrachudo		P24 AE20-80 (A) 4,0	80	79,44	OK	berm fecho da
	P24 AN20-80 (B) 3,0	79	79,15	+ umida		P24 AE20-80 (B) 3,0	79	79,21	borrachudo	berm fecho da
9	P24 AN20-80 (B) 3,5	79	79,01	+ umida	21	P24 AE20-80 (B) 3,5	79	79,03	+ seca	pedrisco aparente
	P24 AN20-80 (B) 4,0	79	78,4	+ umida		P24 AE20-80 (B) 4,0	79	79,03	OK	pedrisco aparente
	P24 AN20-80 (A) 3,0	80	79,34	+ umida		P24 AE20-80 (A) 3,0	80	79,79	OK	pedrisco aparente
	P24 AN30-70 (A) 3,5	80	79,61	OK		P24 AE30-70 (A) 3,5	80	79,58	+ seca	algunas imperfeições
11	P24 AN30-70 (A) 4,0	80	80,22	OK	23	P24 AE30-70 (A) 4,0	80	79,43	OK	algunas imperfeições
	P24 AN30-70 (B) 3,0	79	79,62	+ umida		P24 AE30-70 (B) 3,0	79	78,89	+ umida	algunas imperfeições
	P24 AN30-70 (B) 3,5	79	79,39	++ umida		P24 AE30-70 (B) 3,5	79	78,83	OK	algunas imperfeições
	P24 AN30-70 (B) 4,0	79	78,54	+ umida		P24 AE30-70 (B) 4,0	79	78,91	OK	algunas imperfeições
12	P24 AN30-70 (B) 3,5	79	79,39	++ umida	24	P24 AE30-70 (B) 3,5	79	78,83	OK	algunas imperfeições
	P24 AN30-70 (B) 3,0	79	79,62	+ umida		P24 AE30-70 (B) 3,0	79	78,89	+ umida	algunas imperfeições
	P24 AN30-70 (B) 3,5	79	79,39	++ umida		P24 AE30-70 (B) 3,5	79	78,83	OK	algunas imperfeições
	P24 AN30-70 (B) 4,0	79	78,54	+ umida		P24 AE30-70 (B) 4,0	79	78,91	OK	algunas imperfeições

Tabela 15: Resultados de energia de compactação dos corpos-de-prova

Nº	CPs	%sol. Teórico	% sol. Real	Energia Potencial (J)	Sd (J)	CV (%)	Nº	CPs	%sol. Teórico	% sol. Real	Energia Potencial (J)	Sd (J)	CV (%)
1	P16 AN20-80 (A) 3,0	80	79,29	264,0	27,7	11,2	13	P16 AB20-80 (A) 3,0	80	79,39	456,0	27,7	6,3
	P16 AN20-80 (A) 3,5	80	79,29	144,0	13,9	9,1		P16 AB20-80 (A) 3,5	80	79,47	336,0	17,0	5,2
	P16 AN20-80 (A) 4,0	80	79,32	192,0	0,0	0,0		P16 AB20-80 (A) 4,0	80	79,33	336,0	13,9	4,2
2	P16 AN20-80 (B) 3,0	79	78,65	144,0	17,0	10,9	14	P16 AB20-80 (B) 3,0	79	78,39	240,0	17,0	6,7
	P16 AN20-80 (B) 3,5	79	78,05	120,0	13,9	10,2		P16 AB20-80 (B) 3,5	79	78,76	240,0	17,0	7,4
	P16 AN20-80 (B) 4,0	79	78,98	120,0	0,0	0,0		P16 AB20-80 (B) 4,0	79	78,74	264,0	33,9	14,1
3	P16 AN30-70 (A) 3,0	80	79,04	192,0	17,0	8,3	15	P16 AB30-70 (A) 3,0	80	79,15	360,0	0,0	0,0
	P16 AN30-70 (A) 3,5	80	78,82	144,0	17,0	8,3		P16 AB30-70 (A) 3,5	80	79,59	384,0	36,7	10,7
	P16 AN30-70 (A) 4,0	80	78,74	168,0	13,9	8,7		P16 AB30-70 (A) 4,0	80	79,61	288,0	24,0	9,1
4	P16 AN30-70 (B) 3,0	79	78,63	192,0	13,9	7,5	16	P16 AB30-70 (B) 3,0	79	78,31	168,0	33,9	12,9
	P16 AN30-70 (B) 3,5	79	78,16	144,0	13,9	9,1		P16 AB30-70 (B) 3,5	79	78,47	288,0	13,9	5,1
	P16 AN30-70 (B) 4,0	79	78,61	120,0	13,9	10,8		P16 AB30-70 (B) 4,0	79	78,77	168,0	13,9	7,9
5	P20 AN20-80 (A) 3,0	80	79,12	168,0	27,7	13,9	17	P20 AB20-80 (A) 3,0	80	79,37	312,0	13,9	4,3
	P20 AN20-80 (A) 3,5	80	79,79	264,0	33,9	14,1		P20 AB20-80 (A) 3,5	80	79,16	216,0	33,9	11,8
	P20 AN20-80 (A) 4,0	80	80,54	192,0	13,9	7,9		P20 AB20-80 (A) 4,0	80	79,43	240,0	13,9	5,6
6	P20 AN20-80 (B) 3,0	79	78,45	144,0	17,0	10,9	18	P20 AB20-80 (B) 3,0	79	78,74	264,0	27,7	9,9
	P20 AN20-80 (B) 3,5	79	78,76	120,0	13,9	10,8		P20 AB20-80 (B) 3,5	79	78,72	288,0	13,9	5,1
	P20 AN20-80 (B) 4,0	79	78,48	144,0	0,0	0,0		P20 AB20-80 (B) 4,0	79	78,69	192,0	17,0	6,7
7	P20 AN30-70 (A) 3,0	80	79,15	264,0	24,0	8,3	19	P20 AB30-70 (A) 3,0	80	78,47	432,0	0,0	0,0
	P20 AN30-70 (A) 3,5	80	79,57	216,0	0,0	0,0		P20 AB30-70 (A) 3,5	80	79,25	312,0	0,0	0,0
	P20 AN30-70 (A) 4,0	80	79,16	216,0	17,0	8,3		P20 AB30-70 (A) 4,0	80	79,55	312,0	27,7	9,9
8	P20 AN30-70 (B) 3,0	79	78,24	216,0	17,0	8,3	20	P20 AB30-70 (B) 3,0	79	78,8	288,0	24,0	9,1
	P20 AN30-70 (B) 3,5	79	78,69	120,0	0,0	0,0		P20 AB30-70 (B) 3,5	79	78,43	288,0	0,0	0,0
	P20 AN30-70 (B) 4,0	79	78,61	144,0	13,9	9,1		P20 AB30-70 (B) 4,0	79	78,3	240,0	24,0	10,0
9	P24 AN20-80 (A) 3,0	80	79,59	240,0	0,0	0,0	21	P24 AB20-80 (A) 3,0	80	79,44	336,0	27,7	8,7
	P24 AN20-80 (A) 3,5	80	79,83	144,0	17,0	12,9		P24 AB20-80 (A)3,5	80	80,12	624,0	67,9	11,8
	P24 AN20-80 (A) 4,0	80	79,96	72,0	0,0	0,0		P24 AB20-80 (A) 4,0	80	79,44	216,0	24,0	10,0
10	P24 AN20-80 (B) 3,0	79	79,15	192,0	13,9	7,5	22	P24 AB20-80 (B) 3,0	79	79,21	288,0	13,9	4,7
	P24 AN20-80 (B) 3,5	79	79,01	120,0	0,0	0,0		P24 AB20-80 (B) 3,5	79	79,03	168,0	0,0	0,0
	P24 AN20-80 (B) 4,0	79	78,4	120,0	0,0	0,0		P24 AB20-80 (B) 4,0	79	79,03	192,0	0,0	0,0
11	P24 AN30-70 (A) 3,0	80	79,34	192,0	24,0	11,1	23	P24 AB30-70 (A) 3,0	80	79,79	288,0	0,0	0,0
	P24 AN30-70 (A) 3,5	80	79,61	192,0	13,9	7,9		P24 AB30-70 (A) 3,5	80	79,58	288,0	13,9	5,1
	P24 AN30-70 (A) 4,0	80	80,22	360,0	33,9	10,1		P24 AB30-70 (A) 4,0	80	79,43	264,0	13,9	5,1
12	P24 AN30-70 (B) 3,0	79	79,62	120,0	0,0	0,0	24	P24 AB30-70 (B) 3,0	79	78,89	240,0	0,0	0,0
	P24 AN30-70 (B) 3,5	79	79,39	120,0	0,0	0,0		P24 AB30-70 (B) 3,5	79	78,83	168,0	13,9	7,5
	P24 AN30-70 (B) 4,0	79	78,54	96,0	0,0	0,0		P24 AB30-70 (B) 4,0	79	78,91	168,0	0,0	0,0

Conforme citado anteriormente (item 5.4.1.3), a altura de queda do soquete era de 41,5cm, que equivale a 24J. Portanto, na Tabela 15, o resultado da quantidade de energia foi obtido multiplicando-se o número de golpes necessários para atingir a altura estabelecida para o corpo-de-prova pela energia de um golpe, que é igual a 24J.

Para uma melhor visualização dos valores contidos nas Tabelas 13 e 15, apresentam-se, algumas figuras ilustrando os dados destas tabelas.

As Figuras 26, 27 e 28 mostram a resistência à compressão e a energia de compactação de cada uma das misturas moldadas. Para a elaboração dos gráficos, os dados foram separados por traço. A Figura 26 apresenta todas as misturas para o traço 1:3, já a Figura 27 para o traço 1:3,5 e, por fim, a Figura 28 para o traço 1:4.

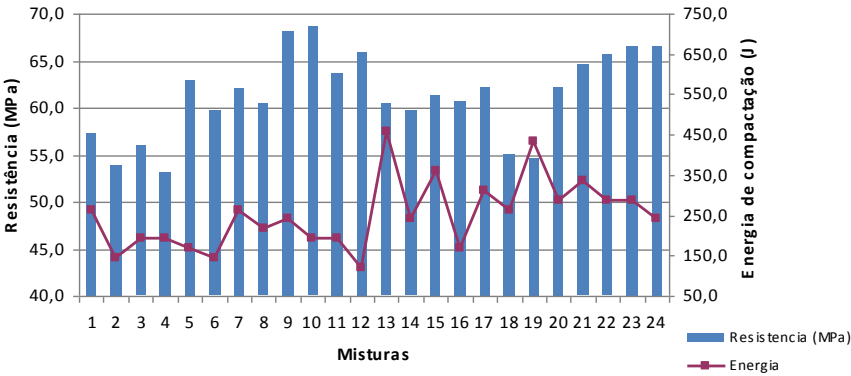


Figura 26: Resistência e energia para misturas com traço 1:3,0.

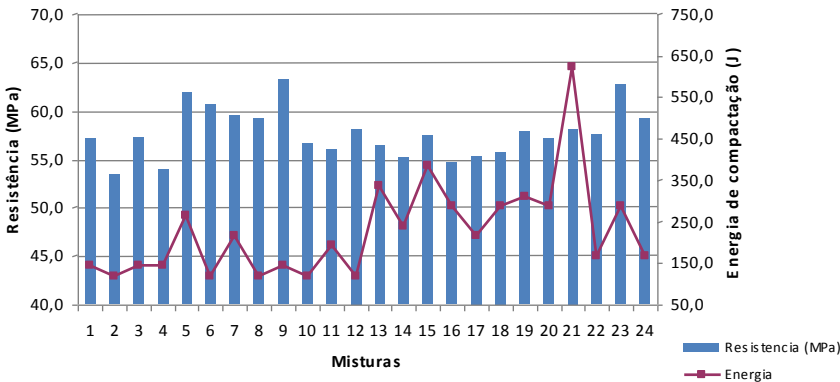


Figura 27: Resistência e energia para misturas com traço 1:3,5.

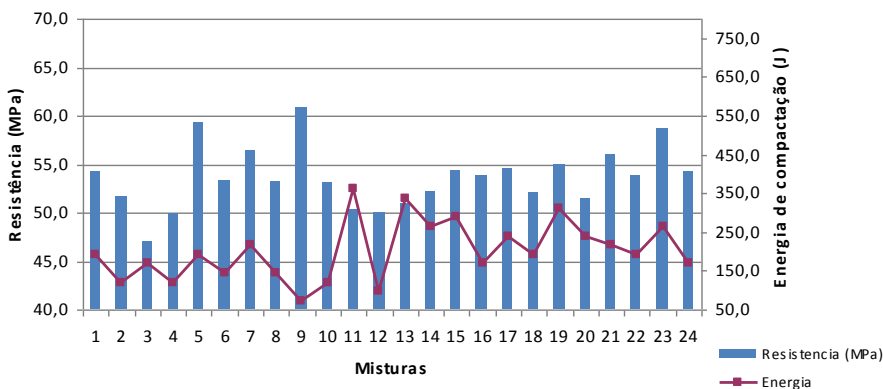


Figura 28: Resistência e energia para misturas com traço 1:4,0.

Tabela 16: Valores médios de resistência à compressão e energia de compactação das misturas com areia natural e areia de britagem.

Traço/ Misturas	1: 3,0		1: 3,5		1: 4,0	
	Resistência Média (MPa)	Energia Média (J)	Resistência Média (MPa)	Energia Média (J)	Resistência Média (MPa)	Energia Média (J)
De 1 a 12 (areia natural)	61,0	194	58,1	154	53,3	162
De 13 a 24 (areia britagem)	61,6	306	57,3	300	53,9	240

Resistência à compressão e energia de compactação

A Tabela 13 apresenta a resistência à compressão potencial de cada mistura realizada. Foi utilizada a resistência potencial e não a resistência média, pois, nesta etapa, era importante identificar quais misturas poderiam alcançar maiores resistências para, então, levá-las até a fábrica e verificar o comportamento das mesmas em escala de produção. Entretanto, no ANEXO II encontram-se todos os valores de resistência à compressão e energia de compactação obtidos nesta etapa de estudos em laboratório.

Os valores encontrados de resistência à compressão em função da variação de umidade mostram uma tendência de aumento das resistências com o aumento da umidade. Porém, ocorreu, em alguns casos, que umidades mais baixas resultaram em resistências maiores que as obtidas com umidades mais altas. Isto, provavelmente, ocorreu pelo

fato de a umidade mais baixa ter sido a umidade ótima, sendo que, a partir deste ponto, mesmo a mistura tendo mais água ocorre um decréscimo de resistência.

Além disso, a Tabela 13 mostra uma íntima relação entre o teor de sólidos e a resistência dos corpos-de-prova. Como era de se esperar, maiores teores de sólidos levaram a resistências superiores.

Observou-se, também, que as maiores resistências obtidas, tanto para areia natural como para areia de britagem, foram com o maior teor de pedrisco (24%), ou seja, deve-se utilizar o maior teor de agregado graúdo possível, visto que este ajuda na resistência mecânica das peças, desde que não comprometa a aparência e a coesão da mesma.

Quanto às areias, observou-se que, em alguns casos, a resistência aumentou com a substituição da areia natural pela de britagem, porém, as maiores resistências obtidas foram com areia natural. Entretanto, o teor de areia fina pouco influenciou nos resultados de resistência à compressão.

Os traços mais ricos apresentaram maiores resistências que os mais pobres, pois, com um maior consumo de cimento, o mesmo envolve melhor os grãos, proporcionando uma mistura mais compacta e, consequentemente, mais resistente. Porém, quando este traço é muito rico (caso do traço 1:3) por já possuir uma grande quantidade de pasta de cimento mais uma grande quantidade de finos (provenientes da areia de britagem) ocorre um excesso de finos, exigindo um maior consumo de água na mistura, fazendo com que, em muitos casos, haja a formação do “borrachudo”. O “borrachudo” faz com que a peça fique flexível e não atinja resistência adequada. Portanto, uma solução para esse tipo de problema seria retirar o excesso de finos da areia de britagem. Para verificar esta hipótese, foi feito um estudo específico, retirando os finos da areia cujos resultados serão expostos mais adiante.

As Figuras 26, 27 e 28 mostram que as misturas que obtiveram os melhores resultados quanto à maior resistência à compressão com menor energia de compactação foram as misturas com areia natural (nas Figuras misturas de 1 a 12).

Através das Figuras 26 a 28 e da Tabela 16, observa-se, ainda, que no traço mais pobre (traço 1:4), ao contrário dos traços mais ricos, quando utilizada areia de britagem, a energia média de compactação demandada não aumentou tão significativamente. Isso ocorre porque em traços mais ricos há um excesso de quantidade de finos tornando a mistura mais difícil de compactar.

Apesar de, em alguns casos, haver o aumento da resistência à compressão com a utilização de areia de britagem, esta aumentou em

muito a energia necessária para compactação dos corpos-de-prova. Para todos os traços estudados, existiu esse aumento, chegando a ser necessário, em alguns casos, três vezes mais energia para compactar o corpo-de-prova.

Da mesma forma, traços mais ricos em cimento também exigiram maior energia de compactação. Fato este esperado, visto que quanto maior o consumo de cimento, mais rica em finos fica a mistura, tornando-a, portanto mais difícil de compactar.

Observa-se, ainda, nas Figuras 26, 27 e 28 que a mistura que apresentou um melhor resultado quanto ao binômio resistência à compressão x energia de compactação foi a mistura 9, mistura esta composta por maior teor de pedrisco, com composição de areia natural 20-80% e mesmo aquelas moldadas com o traço mais pobre (1:4) atingiram a resistência exigida (50MPa).

Textura

A análise deste parâmetro foi feita visualmente durante a moldagem dos corpos-de-prova, ou seja, foi uma avaliação qualitativa. A textura de uma PCP é uma propriedade vinculada à aparência do mesmo. Atualmente, visto a dificuldade das empresas em produzirem peças com 50MPa de resistência à compressão, a textura não é tão relevante desde que alcance tal resistência, por isso aqui não foi dada tanta importância a este parâmetro.

Observou-se, nesta etapa do trabalho, que os corpos-de-prova com maiores teores de pedrisco, tanto para areia natural quanto para de britagem apresentaram uma textura mais grosseira, mostrando algumas imperfeições nas laterais dos corpos-de-prova, porém, nada que comprometesse a peça (Figura 29-a).

Da mesma forma, a análise também mostrou que os corpos-de-prova que apresentaram melhor textura, mais fechada, foram aqueles com areia de britagem e com menor teor de pedrisco (Figura 29-b).

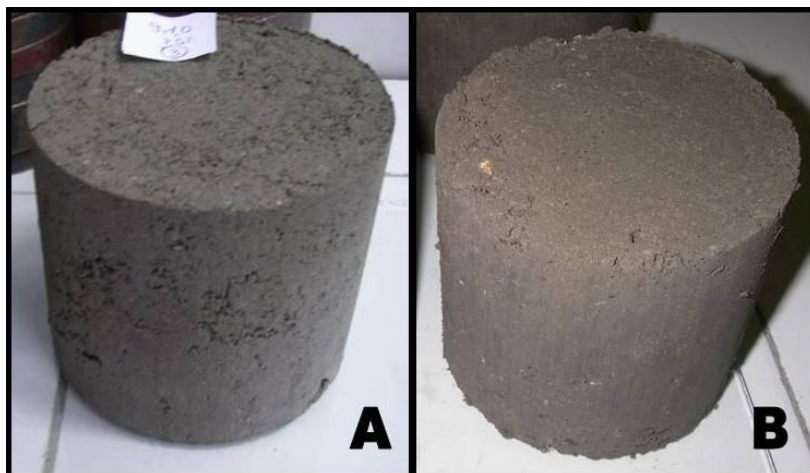


Figura 29: Textura dos corpos-de-prova.

6.1.2 Testes estatísticos

Com o objetivo de avaliar a influência das variáveis estudadas, foi empregada, neste trabalho, a comparação múltipla de médias pelo teste estatístico ANOVA.

O teste ANOVA proporciona a comprovação, com uma determinada confiabilidade, da influência ou não de uma ou mais variáveis envolvidas no estudo realizado. Este modelo estatístico pode ser de 1ª, 2ª ou 3ª ORDEM.

Quando as variáveis são avaliadas individualmente, para verificar seu nível de significância, diz-se que esta é uma análise de 1ª ORDEM, indicando se a variação do parâmetro influi ou não na propriedade analisada.

Na análise de 2ª ORDEM, os parâmetros são organizados de modo a poder avaliar, simultaneamente, a influência dos mesmos na propriedade analisada.

Já para a análise de 3ª ORDEM, um parâmetro é avaliado sempre com um par de outros parâmetros. Tanto na análise de 2ª ORDEM, como na de 3ª ORDEM, é possível avaliar, isoladamente, a influência de cada parâmetro, bem como, a interação entre eles.

Nesta dissertação, com o objetivo de avaliar a influência do traço, umidade, % sólidos, o teor de pedrisco, o teor de areia fina e o tipo de areia grossa na resistência à compressão do concreto e na energia necessária para a compactação do mesmo, foi utilizado um modelo fatorial. Esta análise foi empregada para facilitar a visualização dos resultados e da interação entre eles. Contudo, para englobar todas as variáveis envolvidas no processo foram feitos 12 testes a três fatores.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos com este estudo estatístico.

Tabela 17: Legenda empregada nas tabelas ANOVA.

Sigla	Descrição
SQ	Soma dos quadrados
GDL	Graus de liberdade
MQ	Médias quadradas
% sol.	porcentagem volume de sólidos
H	umidade
P	teor de pedrisco
T	Traço
teor A	teor de areia
tipo A	tipo de areia

Tabela 18: Resultados da ANOVA para valores de resistência (H x P x T)

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.434,74	2	2.217,37	53,22	3,00	Influencia significativamente	2,685E-21
Umidade	294,99	1	294,99	7,08	3,84	Influencia significativamente	8,095E-03
Teor pedrisco	2.182,48	2	1.091,24	26,19	3,00	Influencia significativamente	1,944E-11
T x H	16,59	2	8,30	0,20	3,00	Não influencia significativamente	8,195E-01
T x P	386,66	4	96,67	2,32	2,37	Não influencia significativamente	5,627E-02
H x P	144,45	2	72,23	1,73	3,00	Não influencia significativamente	1,779E-01
T x H x P	95,65	4	23,91	0,57	2,37	Não influencia significativamente	6,817E-01
Residual	17.247,71	414	41,66				
Total	24.803,27	431	57,55				

**Tabela 19: Resultados da ANOVA para valores de resistência
(teorA x tipoA x H)**

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Umidade	294,99	1	294,99	5,22	3,84	Influencia significativamente	0,022772235
Teor areia	13,29	1	13,29	0,24	3,84	Não influencia significativamente	0,627861482
Tipo areia	155,53	1	155,53	2,75	3,84	Não influencia significativamente	0,097738599
H x teor A	2,27	1	2,27	0,04	3,84	Não influencia significativamente	0,841360247
H x tipo A	233,85	1	233,85	4,14	3,84	Influencia significativamente	0,042475246
teor A x tipo A	126,13	1	126,13	2,23	3,84	Não influencia significativamente	0,135781824
H x teorA x tipoA	34,26	1	34,26	0,61	3,84	Não influencia significativamente	0,436434584
Residual	23.942,96	424	56,47				
Total	24.803,27	431	57,55				

**Tabela 20: Resultados da ANOVA para valores de resistência
(T x H x %sólidos)**

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.434,74	2	2.217,37	48,51	3,00	Influencia significativamente	1,115E-19
Umidade	294,99	1	294,99	6,45	3,84	Influencia significativamente	1,144E-02
% sólidos	330,27	1	330,27	7,22	3,84	Influencia significativamente	7,476E-03
T x H	16,59	2	8,30	0,18	3,00	Não influencia significativamente	8,341E-01
T x %sol.	57,99	2	28,99	0,63	3,00	Não influencia significativamente	5,308E-01
H x %sol.	440,76	1	440,76	9,64	3,84	Influencia significativamente	2,031E-03
T x H x %sol.	28,30	2	14,15	0,31	3,00	Não influencia significativamente	7,339E-01
Residual	19.199,63	420	45,71				
Total	24.803,27	431	57,55				

**Tabela 21: Resultados da ANOVA para valores de resistência
(T x teorA x tipoA).**

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	44,66	3,00	Influencia significativamente	2,599E-18
Teor areia	5,03	1	5,03	0,11	3,84	Não influencia significativamente	7,444E-01
Tipo areia	192,49	1	192,49	4,07	3,84	Influencia significativamente	4,419E-02
T x teor A	215,99	2	107,99	2,29	3,00	Não influencia significativamente	1,030E-01
T x tipo A	32,54	2	16,27	0,34	3,00	Não influencia significativamente	7,089E-01
teor A x tipo A	96,59	1	96,59	2,04	3,84	Não influencia significativamente	1,535E-01
T x teorA x tipoA	24,48	2	12,24	0,26	3,00	Não influencia significativamente	7,719E-01
Residual	19.844,80	420	47,25				
Total	24.632,12	431	57,15				

Tabela 22: Resultados da ANOVA para valores de resistência (P x teorA x tipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Teor pedrisco	2.234,30	2	1.117,15	23,24	3,00	Influencia significativamente	2,684E-10
Teor areia	5,03	1	5,03	0,10	3,84	Não influencia significativamente	7,466E-01
Tipo areia	192,49	1	192,49	4,00	3,84	Influencia significativamente	4,604E-02
%pedr x teorA	30,23	2	15,11	0,31	3,00	Não influencia significativamente	7,304E-01
%pedr x tipoA	1.879,79	2	939,89	19,55	3,00	Influencia significativamente	7,619E-09
teorA x tipoA	96,59	1	96,59	2,01	3,84	Não influencia significativamente	1,571E-01
%pedr x teor x tipo	1,33	2	0,67	0,01	3,00	Não influencia significativamente	9,863E-01
Residual	20.192,37	420	48,08				
Total	24.632,12	431	57,15				

Tabela 23: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x %sólidos).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	51,23	3,00	Influencia significativamente	1,322E-20
%sólidos	281,25	1	281,25	6,83	3,84	Influencia significativamente	9,301E-03
Teor pedrisco	2.234,30	2	1.117,15	27,12	3,00	Influencia significativamente	8,543E-12
T x %sol.	78,83	2	39,41	0,96	3,00	Não influencia significativamente	3,849E-01
T x P	463,02	4	115,76	2,81	2,37	Influencia significativamente	2,527E-02
%sol x P	10,15	2	5,08	0,12	3,00	Não influencia significativamente	8,841E-01
T x %sol x P	291,35	4	72,84	1,77	2,37	Não influencia significativamente	1,343E-01
Residual	17.053,01	414	41,19				
Total	24.632,12	431	57,15				

Tabela 24: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x tipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	57,14	3,00	Influencia significativamente	1,222E-22
Tipo areia	192,49	1	192,49	5,21	3,84	Influencia significativamente	2,294E-02
Teor pedrisco	2.234,30	2	1.117,15	30,25	3,00	Influencia significativamente	5,472E-13
T x tipo	32,54	2	16,27	0,44	3,00	Não influencia significativamente	6,440E-01
T x P	463,02	4	115,76	3,13	2,37	Influencia significativamente	1,473E-02
tipo x P	1.879,79	2	939,89	25,45	3,00	Influencia significativamente	3,763E-11
T x tipo x P	320,58	4	80,14	2,17	2,37	Não influencia significativamente	7,158E-02
Residual	15.289,20	414	36,93				
Total	24.632,12	431	57,15				

**Tabela 25: Resultados da ANOVA para valores de resistência
(T x tipoA x %sólidos).**

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	45,77	3,00	Influencia significativamente	1,042E-18
Tipo	192,49	1	192,49	4,18	3,84	Influencia significativamente	4,164E-02
% sólidos	281,25	1	281,25	6,10	3,84	Influencia significativamente	1,391E-02
T x tipo	32,54	2	16,27	0,35	3,00	Não influencia significativamente	7,028E-01
T x %sol.	78,83	2	39,41	0,85	3,00	Não influencia significativamente	4,261E-01
tipo x %sol.	347,96	1	347,96	7,55	3,84	Influencia significativamente	6,268E-03
T x tipo x %sol.	115,56	2	57,78	1,25	3,00	Não influencia significativamente	2,866E-01
Residual	19.363,29	420	46,10				
Total	24.632,12	431	57,15				

**Tabela 26: Resultados da ANOVA para valores de resistência
(T x P x teorA).**

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	50,40	3,00	Influencia significativamente	2,564E-20
Teor areia	5,03	1	5,03	0,12	3,84	Não influencia significativamente	7,291E-01
Teor pedrisco	2.234,30	2	1.117,15	26,68	3,00	Influencia significativamente	1,257E-11
T x teor	215,99	2	107,99	2,58	3,00	Não influencia significativamente	7,702E-02
T x P	463,02	4	115,76	2,77	2,37	Influencia significativamente	2,723E-02
teor x P	30,23	2	15,11	0,36	3,00	Não influencia significativamente	6,972E-01
T x teor x P	131,36	4	32,84	0,78	2,37	Não influencia significativamente	5,357E-01
Residual	17.331,99	414	41,86				
Total	24.632,12	431	57,15				

**Tabela 27: Resultados da ANOVA para valores de resistência
(T x teorA x %sólidos).**

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	45,97	3,00	Influencia significativamente	8,847E-19
Teor areia	5,03	1	5,03	0,11	3,84	Não influencia significativamente	7,408E-01
% sólidos	281,25	1	281,25	6,13	3,84	Influencia significativamente	1,371E-02
T x teor	215,99	2	107,99	2,35	3,00	Não influencia significativamente	9,637E-02
T x %sol.	78,83	2	39,41	0,86	3,00	Não influencia significativamente	4,245E-01
teor x %sol.	93,34	1	93,34	2,03	3,84	Não influencia significativamente	1,546E-01
T x teor x %sol.	458,25	2	229,13	4,99	3,00	Influencia significativamente	7,204E-03
Residual	19.279,22	420	45,90				
Total	24.632,12	431	57,15				

Tabela 28: Resultados da ANOVA para valores de resistência (T x P x tipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	4.220,20	2	2.110,10	51,23	3,00	Influencia significativamente	1,322E-20
Tipo areia	281,25	1	281,25	6,83	3,84	Influencia significativamente	9,301E-03
Teor pedrisco	2.234,30	2	1.117,15	27,12	3,00	Influencia significativamente	8,543E-12
T x tipo	78,83	2	39,41	0,96	3,00	Não influencia significativamente	3,849E-01
T x P	463,02	4	115,76	2,81	2,37	Influencia significativamente	2,527E-02
tipo x P	10,15	2	5,08	0,12	3,00	Não influencia significativamente	8,841E-01
T x tipo x P	291,35	4	72,84	1,77	2,37	Não influencia significativamente	1,343E-01
Residual	17.053,01	414	41,19				
Total	24.632,12	431	57,15				

Tabela 29: Resultados da ANOVA para valores de resistência (TipoA x TeorA x % sólidos).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
%sólidos	281,25	1	281,25	5,05	3,84	Influencia significativamente	0,025071849
Tipo areia	5,03	1	5,03	0,09	3,84	Não influencia significativamente	0,763855855
Teor areia	192,49	1	192,49	3,46	3,84	Não influencia significativamente	0,063583893
H x teor A	93,34	1	93,34	1,68	3,84	Não influencia significativamente	0,195946523
H x tipo A	347,96	1	347,96	6,25	3,84	Influencia significativamente	0,012770278
teor A x tipo A	96,59	1	96,59	1,74	3,84	Não influencia significativamente	0,188371569
H x teorA x tipoA	23,61	1	23,61	0,42	3,84	Não influencia significativamente	0,515131017
Residual	23.591,85	424	55,64				
Total	24.632,12	431	57,15				

Análise dos resultados das Tabelas 18 a 29.

Na análise de 1ª ORDEM (variáveis isoladas), houve influência significativa das variáveis umidade, traço, % sólidos, e teor de pedrisco. As variáveis: tipo de areia grossa e, principalmente, teor de areia fina não influenciaram significativamente quando analisadas isoladamente. Dentre as variáveis, a que mais influenciou na resistência à compressão foi o traço, seguido pelo teor de pedrisco. Para facilitar a visualização desta afirmação, foi feita uma síntese dos valores de alfa (α) obtidos nos diferentes testes de análise de variância realizados. (Tabela 30)

Tabela 30: Valores médios de alfa (α) para as variáveis analisadas em relação à resistência à compressão.

Resistência à compressão - Valores de α (alfa)						
	Umidade	Traço	Teor sólidos	Teor pedrisco	Tipo areia grossa	Teor areia fina
Tabela 17	8,095E-03	2,685E-21	-	1,944E-11	-	-
Tabela 18	2,277E-02	-	-	-	9,774E-02	6,279E-01
Tabela 19	1,144E-02	1,115E-19	7,476E-03	-	-	-
Tabela 20	-	2,599E-18	-	-	4,419E-02	7,444E-01
Tabela 21	-	-	-	2,684E-10	4,604E-02	7,466E-01
Tabela 22	-	1,322E-20	9,301E-03	8,543E-12	-	-
Tabela 23	-	1,222E-22	-	5,472E-13	2,294E-02	-
Tabela 24	-	1,042E-18	1,391E-02	-	4,164E-02	-
Tabela 25	-	2,564E-20	-	1,257E-11	-	7,291E-01
Tabela 26	-	8,847E-19	1,371E-02	-	-	7,408E-01
Tabela 27	-	1,322E-20	-	8,543E-12	9,301E-03	-
Tabela 28	-	-	2,507E-02	-	6,358E-02	7,639E-01

Na análise de 2ª ORDEM (variáveis analisadas de duas a duas), seguindo a tendência da primeira ordem, os parâmetros que mais influenciaram, quando analisados conjuntamente, foram o traço x teor de pedrisco. O único parâmetro que aqui não apresentou influência conjunta com outro fator foi o teor de areia fina.

Na análise de 3ª ORDEM (variáveis avaliadas três a três), com exceção da combinação traço x teor de areia x % sólidos que apresentaram influência significativa na resistência, o restante das variáveis não apresentou influência significativa.

Portando, através do estudo estatístico, pode-se concluir que todas as variáveis envolvidas apresentam, em maior ou menor escala, influência na resistência do concreto. Em ordem decrescente, pode-se afirmar que a ordem de influência seria: traço, teor de pedrisco, umidade, porcentagem de volume de sólidos, tipo de areia grossa e teor de areia fina.

Vale ressaltar que, para os efeitos de 1ª, 2ª, e 3ª ORDEM, todas as conclusões acima citadas podem ser afirmadas com 95% de confiabilidade.

Para a análise quanto à energia de compactação das peças, foi feito um estudo estatístico de maneira semelhante ao estudo estatístico realizado para a análise da influência das variáveis na resistência à compressão das peças. Nas tabelas a seguir, de 31 a 42 são apresentados os resultados deste estudo estatístico.

Tabela 31: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x H x P).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	229.544,00	2	114.772,00	11,99	3,00	Influencia significativamente	8,677E-06
Umidade	9.408,00	1	9.408,00	0,98	3,84	Não influencia significativamente	3,221E-01
Teor pedrisco	37.208,00	2	18.604,00	1,94	3,00	Não influencia significativamente	1,445E-01
T x H	5.432,00	2	2.716,00	0,28	3,00	Não influencia significativamente	7,531E-01
T x P	22.520,00	4	5.630,00	0,59	2,37	Não influencia significativamente	6,714E-01
H x P	87.752,00	2	43.876,00	4,58	3,00	Influencia significativamente	1,075E-02
T x H x P	44.984,00	4	11.246,00	1,17	2,37	Não influencia significativamente	3,213E-01
Residual	3.963.216,00	414	9.572,99				
Total	4.400.064,00	431	10.208,97				

Tabela 32: Resultados da ANOVA para valores de energia (H x TeorA x TipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Umidade	11.041,33	1	11.041,33	1,61	3,84	Não influencia significativamente	0,205645977
Teor areia	17.633,33	1	17.633,33	2,57	3,84	Não influencia significativamente	0,109927163
Tipo areia	1.357.441,33	1	1.357.441,33	197,54	3,84	Influencia significativamente	4,18297E-37
H x teor A	59.361,33	1	59.361,33	8,64	3,84	Influencia significativamente	0,00347154
H x tipo A	28.033,33	1	28.033,33	4,08	3,84	Influencia significativamente	0,044036807
teor A x tipo A	2.241,33	1	2.241,33	0,33	3,84	Não influencia significativamente	0,568231345
H x teorA x tipoA	8.748,00	1	8.748,00	1,27	3,84	Não influencia significativamente	0,259839813
Residual	2.913.674,67	424	6.871,87				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 33: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x H x %sólidos).

	SQ	GDL	MQ	F	F _α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	15,14	3,00	Influencia significativamente	4,489E-07
Umidade	11.041,33	1	11.041,33	1,39	3,84	Não influencia significativamente	2,390E-01
% sólidos	677.825,33	1	677.825,33	85,37	3,84	Influencia significativamente	1,246E-18
T x H	6.962,67	2	3.481,33	0,44	3,00	Não influencia significativamente	6,453E-01
T x %sol.	6.370,67	2	3.185,33	0,40	3,00	Não influencia significativamente	6,698E-01
H x %sol.	111.361,33	1	111.361,33	14,03	3,84	Influencia significativamente	2,055E-04
T x H x %sol.	9.538,67	2	4.769,33	0,60	3,00	Não influencia significativamente	5,489E-01
Residual	3.334.704,00	420	7.939,77				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 34: Resultados da ANOVA para valores de energia (T xTeorA x TipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	18,40	3,00	Influencia significativamente	2,187E-08
Teor areia	17.633,33	1	17.633,33	2,70	3,84	Não influencia significativamente	1,011E-01
Tipo areia	1.357.441,33	1	1.357.441,33	207,82	3,84	Influencia significativamente	1,462E-38
T x teor A	7.682,67	2	3.841,33	0,59	3,00	Não influencia significativamente	5,558E-01
T x tipo A	23.762,67	2	11.881,33	1,82	3,00	Não influencia significativamente	1,635E-01
teor A x tipo A	2.241,33	1	2.241,33	0,34	3,84	Não influencia significativamente	5,583E-01
T x teorA x tipoA	5.698,67	2	2.849,33	0,44	3,00	Não influencia significativamente	6,468E-01
Residual	2.743.344,00	420	6.531,77				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 35: Resultados da ANOVA para valores de energia (P x TeorA x TipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Teor pedrisco	37.674,67	2	18.837,33	2,74	3,00	Não influencia significativamente	6,549E-02
Teor areia	17.633,33	1	17.633,33	2,57	3,84	Não influencia significativamente	1,098E-01
Tipo areia	1.357.441,33	1	1.357.441,33	197,70	3,84	Influencia significativamente	4,505E-37
%pedr x teorA	71.466,67	2	35.733,33	5,20	3,00	Influencia significativamente	5,852E-03
%pedr x tipoA	7.722,67	2	3.861,33	0,56	3,00	Não influencia significativamente	5,703E-01
teorA x tipoA	2.241,33	1	2.241,33	0,33	3,84	Não influencia significativamente	5,681E-01
%pedr x teor x tipo	20.266,67	2	10.133,33	1,48	3,00	Não influencia significativamente	2,298E-01
Residual	2.883.728,00	420	6.866,02				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 36: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x %sólidos).

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	14,71	3,00	Influencia significativamente	6,723E-07
%sólidos	677.825,33	1	677.825,33	82,97	3,84	Influencia significativamente	3,591E-18
Teor pedrisco	37.674,67	2	18.837,33	2,31	3,00	Não influencia significativamente	1,010E-01
T x %sol.	6.370,67	2	3.185,33	0,39	3,00	Não influencia significativamente	6,774E-01
T x P	20.989,33	4	5.247,33	0,64	2,37	Não influencia significativamente	6,326E-01
%sol x P	26.058,67	2	13.029,33	1,59	3,00	Não influencia significativamente	2,042E-01
T x %sol x P	6.781,33	4	1.695,33	0,21	2,37	Não influencia significativamente	9,342E-01
Residual	3.382.104,00	414	8.169,33				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 37: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x tipoA).

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	18,72	3,00	Influencia significativamente	1,652E-08
Tipo areia	1.357.441,33	1	1.357.441,33	211,40	3,84	Influencia significativamente	5,507E-39
Teor pedrisco	37.674,67	2	18.837,33	2,93	3,00	Não influencia significativamente	5,431E-02
T x tipo	23.762,67	2	11.881,33	1,85	3,00	Não influencia significativamente	1,585E-01
T x P	20.989,33	4	5.247,33	0,82	2,37	Não influencia significativamente	5,147E-01
tipo x P	7.722,67	2	3.861,33	0,60	3,00	Não influencia significativamente	5,486E-01
T x tipo x P	51.853,33	4	12.963,33	2,02	2,37	Não influencia significativamente	9,096E-02
Residual	2.658.360,00	414	6.421,16				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 38: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x TipoA x %sólidos).

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	25,48	3,00	Influencia significativamente	3,604E-11
Tipo	1.357.441,33	1	1.357.441,33	287,75	3,84	Influencia significativamente	1,553E-49
% sólidos	677.825,33	1	677.825,33	143,69	3,84	Influencia significativamente	1,118E-28
T x tipo	23.762,67	2	11.881,33	2,52	3,00	Não influencia significativamente	8,179E-02
T x %sol.	6.370,67	2	3.185,33	0,68	3,00	Não influencia significativamente	5,096E-01
tipo x %sol.	109.825,33	1	109.825,33	23,28	3,84	Influencia significativamente	1,962E-06
T x tipo x %sol.	1.282,67	2	641,33	0,14	3,00	Não influencia significativamente	8,729E-01
Residual	1.981.296,00	420	4.717,37				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Tabela 39: Resultados da ANOVA para valores de energia (T x P x teorA).

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	12,62	3,00	Influencia significativamente	4,781E-06
Teor areia	17.633,33	1	17.633,33	1,85	3,84	Não influencia significativamente	1,743E-01
Teor pedrisco	37.674,67	2	18.837,33	1,98	3,00	Não influencia significativamente	1,396E-01
T x teor	7.682,67	2	3.841,33	0,40	3,00	Não influencia significativamente	6,683E-01
T x P	20.989,33	4	5.247,33	0,55	2,37	Não influencia significativamente	6,984E-01
teor x P	71.466,67	2	35.733,33	3,75	3,00	Influencia significativamente	2,426E-02
T x teor x P	59.901,33	4	14.975,33	1,57	2,37	Não influencia significativamente	1,807E-01
Residual	3.942.456,00	414	9.522,84				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

**Tabela 40: Resultados da ANOVA para valores de energia
(T x TeorA x %sólidos).**

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	14,88	3,00	Influencia significativamente	5,702E-07
Teor areia	17.633,33	1	17.633,33	2,18	3,84	Não influencia significativamente	1,403E-01
% sólidos	677.825,33	1	677.825,33	83,93	3,84	Influencia significativamente	2,290E-18
T x teor	7.682,67	2	3.841,33	0,48	3,00	Não influencia significativamente	6,218E-01
T x %sol.	6.370,67	2	3.185,33	0,39	3,00	Não influencia significativamente	6,743E-01
teor x %sol.	32.865,33	1	32.865,33	4,07	3,84	Influencia significativamente	4,431E-02
T x teor x %sol.	23.282,67	2	11.641,33	1,44	3,00	Não influencia significativamente	2,378E-01
Residual	3.392.144,00	420	8.076,53				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

**Tabela 41: Resultados da ANOVA para valores de energia
(T x P x TipoA).**

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
Traço	240.370,67	2	120.185,33	14,71	3,00	Influencia significativamente	6,723E-07
Tipo areia	677.825,33	1	677.825,33	82,97	3,84	Influencia significativamente	3,591E-18
Teor pedrisco	37.674,67	2	18.837,33	2,31	3,00	Não influencia significativamente	1,010E-01
T x tipo	6.370,67	2	3.185,33	0,39	3,00	Não influencia significativamente	6,774E-01
T x P	20.989,33	4	5.247,33	0,64	2,37	Não influencia significativamente	6,326E-01
tipo x P	26.058,67	2	13.029,33	1,59	3,00	Não influencia significativamente	2,042E-01
T x tipo x P	6.781,33	4	1.695,33	0,21	2,37	Não influencia significativamente	9,342E-01
Residual	3.382.104,00	414	8.169,33				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

**Tabela 42: Resultados da ANOVA para valores de energia
(%sólidos x teorA x tipoA).**

	SQ	GDL	MQ	F	F α	Com confiabilidade de 95%	α (alfa)
%sólidos	677.825,33	1	677.825,33	130,64	3,84	Influencia significativamente	1,47672E-26
Teor areia	17.633,33	1	17.633,33	3,40	3,84	Não influencia significativamente	0,065947901
Tipo areia	1.357.441,33	1	1.357.441,33	261,63	3,84	Influencia significativamente	3,51363E-46
H x teor A	32.865,33	1	32.865,33	6,33	3,84	Influencia significativamente	0,012209481
H x tipo A	109.825,33	1	109.825,33	21,17	3,84	Influencia significativamente	5,56582E-06
teor A x tipo A	2.241,33	1	2.241,33	0,43	3,84	Não influencia significativamente	0,511369106
H x teorA x tipoA	481,33	1	481,33	0,09	3,84	Não influencia significativamente	0,760831829
Residual	2.199.861,33	424	5.188,35				
Total	4.398.174,67	431	10.204,58				

Análise dos resultados das Tabelas 31 a 42.

Na análise de 1ª ORDEM, houve influência significativa das variáveis: traço, tipo de areia grossa e % sólidos. As demais variáveis não influenciaram significativamente, quando analisadas isoladamente. Dentre as que influenciaram, o tipo de areia grossa seguido pelo % sólidos e pelo traço foram as que mais se destacaram em relação à energia de compactação, conforme pode ser observado através dos valores de significância (α) na tabela 43 abaixo.

Tabela 43: médios de significância (α) para as variáveis analisadas em relação à energia de compactação.

Energia de compactação - Valores de α (alfa)						
	Umidade	Traço	Teor sólidos	Teor pedrisco	Tipo areia grossa	Teor areia fina
Tabela 29	3,221E-01	8,677E-06	-	1,445E-01	-	-
Tabela 30	2,056E-01		-	-	4,183E-37	1,099E-01
Tabela 31	2,390E-01	4,489E-07	1,246E-18	-	-	
Tabela 32	-	2,187E-08	-	-	1,462E-38	1,011E-01
Tabela 33	-		-	6,549E-02	4,505E-37	1,098E-01
Tabela 34	-	68723E-07	3,591E-18	1,010E-01	-	
Tabela 35	-	1,652E-08	-	5,431E-02	5,507E-39	
Tabela 36	-	3,604E-11	1,118E-28	-	1,553E-49	
Tabela 37	-	4,781E-06	-	1,396E-01	-	1,743E-01
Tabela 38	-	5,702E-07	2,290E-18	-	-	1,403E-01
Tabela 39	-	6,723E-07	-	1,010E-01	3,591E-18	
Tabela 40	-		1,477E-26	-	3,514E-46	6,595E-02

Na análise de 2ª ORDEM, seguindo a tendência da primeira ordem, os parâmetros que mais influenciaram, quando analisados conjuntamente, foram o tipo de areia grossa, teor de areia fina além do % sólidos e da umidade. O único parâmetro que aqui não apresentou influência foi o traço.

Na análise de 3ª ORDEM, todas as variáveis, quando testadas as três conjuntamente, não apresentaram influência significativa na energia de compactação do corpo de prova.

Portando, através do estudo estatístico pode-se concluir que todas as variáveis envolvidas apresentam, em maior ou menor escala,

influência na energia de compactação do concreto. Em ordem decrescente, pode-se afirmar que a ordem de influência segundo a ANOVA seria: tipo de areia grossa, porcentagem de volume de sólidos, traço, teor de pedrisco, teor de areia fina e umidade.

Da mesma forma que para as análises feitas em relação à resistência à compressão dos corpos-de-prova, para a energia de compactação todas as conclusões acima citadas podem ser afirmadas com 95% de confiabilidade.

6.2 ESTUDO EM FÁBRICA

Os resultados obtidos com a produção das PCP em fábrica ratificam os resultados alcançados com os corpos-de-prova em laboratório. Na tabela 44, estão apresentados, de forma concentrada, os valores de resistência à compressão, avaliação da energia de compactação (através do tempo de vibro-compressão) e a textura das PCP ensaiadas. Os resultados completos do ensaio de resistência à compressão encontram-se no anexo IV.

Tabela 44: Resultados de resistência, energia e textura das PCP moldadas em fábrica.

Traço	Traço referência laboratório	Resistência Média (MPa)	Sd	CV (%)	Tempo vibro-compressão (s)	Aparência peças	Textura Superficial
Mistura 1	P24 AN20-80 (B) 3,0	67,2	7,4	11,1	4,5	ok	fechada
Mistura 2	P24 AN30-70 (B) 3,0	65,4	8,5	13,0	4,7	ok	bem fechada
Mistura 3	P24 AN20-80 (A) 3,5	63,2	6,6	10,4	4,5	ok	fechada
Mistura 4	P24 AB30-70 (A) 3,0	59,4	3,7	6,3	10,0	borrachudo*	bem fechada
Mistura 5	P24 AB30-70 (A) 3,5	60,9	4,7	7,7	5,5	+ úmida	bem fechada

* colava na sapata do equipamento

Para uma melhor visualização dos valores presentes na Tabela 44, mostra-se a Figura 30, ilustrando os dados desta tabela.

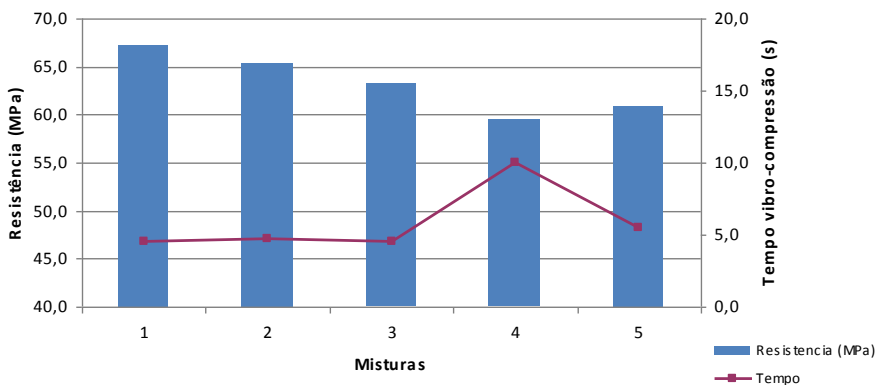


Figura 30: Resistência e energia (tempo de vibro-compressão) para misturas moldadas em fábrica.

Como se pode observar na Figura 30, as PCP que apresentaram maior resistência à compressão, demandando uma menor energia de compactação, foram as produzidas com a mistura 1.

Percebe-se, também, que a substituição de areia natural por areia de britagem, de uma maneira geral, diminuiu a resistência à compressão e aumentou a energia necessária pelo equipamento. Outra observação importante a se fazer, no caso da areia de britagem, principalmente o traço mais rico (1:3, representado pela mistura 4) foi a dificuldade de prensagem das peças produzidas por esta mistura, além da colagem destas peças nas sapatas do equipamento. Acredita-se que esta colagem se deu devido ao excesso de água presente na mistura. Esse aumento na demanda de água é explicado pelo aumento da quantidade de finos, visto que a areia de britagem possui um alto teor de pulverulento, quando comparado com a areia natural. Este alto teor de pulverulento da areia somado a rica quantidade de cimento da mistura 4 (traço 1:3) aumentou a quantidade de água demandada, gerando, assim, peças com dificuldade de serem produzidas. Além disso, percebeu-se o aparecimento de “borrachudos” (peças que apresentam flexibilidade e “estufam” após a desforma). Estes borrachudos, no caso da produção de PCP, devem ser evitados, pois são peças que não apresentam elevada resistência à compressão.

Outra consideração importante a ser destacada é em relação ao traço. Através da Figura 30, nota-se que, no caso da areia de britagem (misturas 4 e 5), não houve um aumento significativo da resistência à compressão quando se aumentou o consumo de cimento (Tabela 41).

Nota-se que o aumento do consumo de cimento aumenta a resistência à compressão até um determinado ponto, formando, após este ponto, uma nuvem onde o enriquecimento do traço não influencia mais significativamente na resistência à compressão das PCP. Para melhor visualização deste efeito, foram feitas curvas relacionando a massa específica das peças com a resistência à compressão obtida. Estas curvas estão apresentadas nas Figuras 31 a 35. Os pontos considerados espúrios para a determinação das equações apresentadas nestas figuras são apresentados em vermelho, enquanto que os pontos apresentados em azul são os usados na regressão.

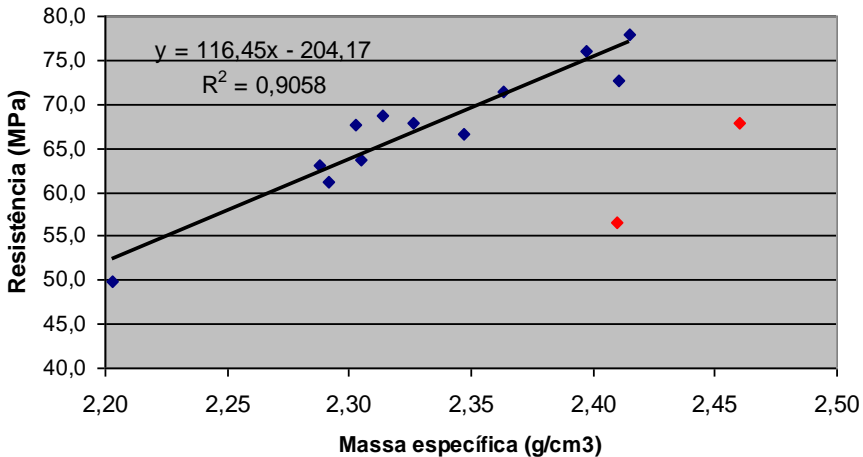


Figura 31: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 1.

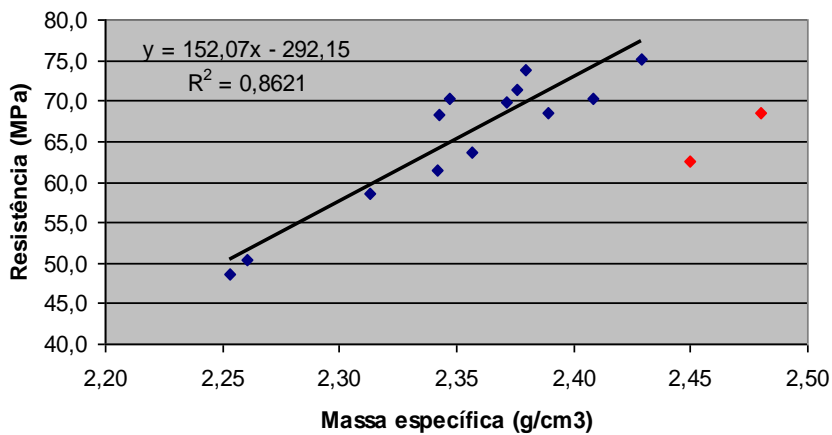


Figura 32: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 2.

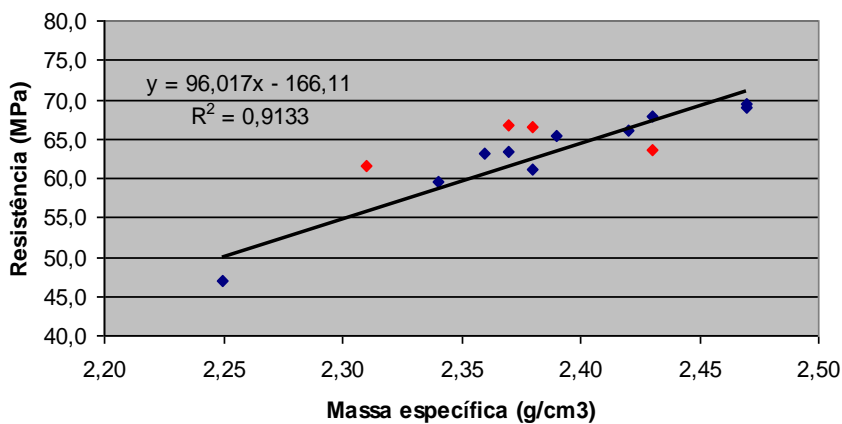


Figura 33: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 3.

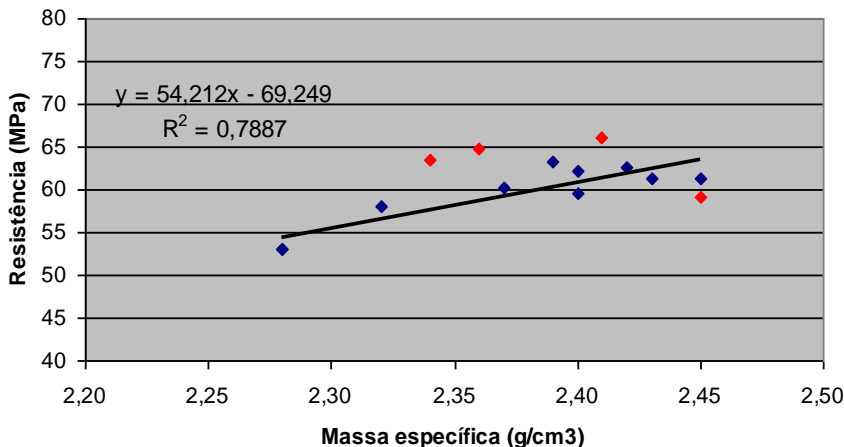


Figura 34: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 4.

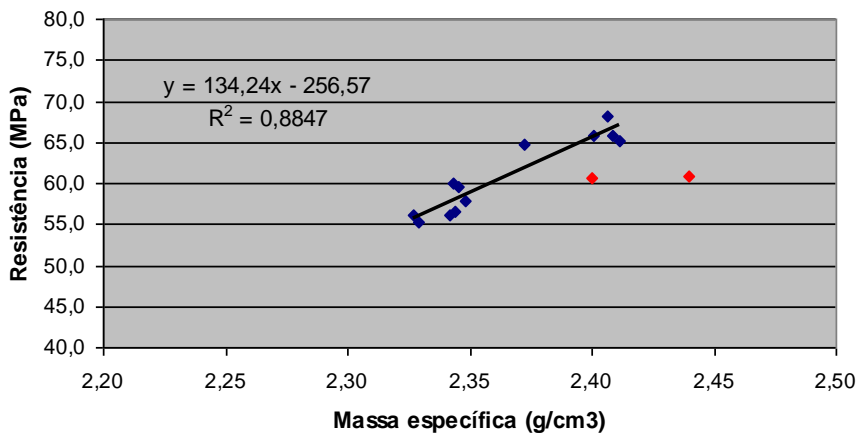


Figura 35: Resistência à compressão x massa específica seca - Mistura 5.

Fazendo-se uma análise estatística dos resultados obtidos (Tabela 45) percebe-se que existe uma correlação significativa entre as variáveis estudadas (massa específica seca x resistência à compressão). Com relação à dispersão dos pontos em relação às curvas ajustadas, para as séries de misturas estudadas, houve uma maior dispersão na mistura 4 (valor de $R^2 = 0,79$).

Tabela 45: Parâmetros estatísticos das correlações estudadas para as PCP produzidas com as misturas avaliadas.

Misturas	Parâmetros estatísticos - significância da relação								
	a	b	Sa	Sb	Se	t	Confiabilidade (%)	n	R ²
Mistura 1	-204,1692	116,4510	27,6863	11,8770	2,3978	9,8047	100,0	12	0,9058
Mistura 2	-292,1493	152,0670	43,1303	18,3376	3,2877	8,2926	100,0	13	0,8621
Mistura 3	-166,1074	96,0165	24,9850	10,4592	2,0592	9,1801	100,0	10	0,9133
Mistura 4	-69,2488	54,2118	23,5602	9,9213	1,8088	5,4642	100,0	10	0,7887
Mistura 5	-256,5658	134,2379	36,2478	15,3263	1,6706	8,7587	100,0	12	0,8847

É importante ressaltar que, conforme observado nas Figuras 34 e 35, quando utilizada areia de britagem, as PCP chegam a um ponto onde, independente do acréscimo de cimento ou de peso, ou seja, aumento da massa específica, não há o consequente aumento da resistência à compressão, mas sim a formação de peças com o “borrachudo”. Procurou-se, então, determinar o porquê deste comportamento, sendo que duas hipóteses foram levantadas: a primeira de que a quantidade de material pulverulento existente na mistura era muito grande, ou seja, havia em excesso de finos. A segunda de que a quantidade de vazios a serem preenchidos na mistura era tão pequena ou inexistente que não havia mais possibilidade de ganho de resistência mesmo com o acréscimo de tempo de vibro-prensagem (para tornar as peças mais compactas). Abaixo, seguem os estudos realizados para a comprovação destas hipóteses:

a) Excesso da quantidade de finos na mistura

Para entender melhor o comportamento das PCP feitas sem este alto teor de pulverulento, as areias de britagem empregadas anteriormente foram lavadas (conforme item 5.4.2.3). Os resultados obtidos das PCP produzidas com as novas misturas encontram-se na Tabela 46.

Tabela 46: Resultados de resistência e textura das PCP moldadas com areia de britagem.

Traço	densidade média (g/cm ³)	Resistência Média (MPa)	Sd	CV (%)	Tempo vibro-compressão (s)	Aparência peças	Textura Superficial
Mistura 4	2,37	59,4	3,7	6,3	10,0	borrachudo*	bem fechada
Mistura lav.4	2,45	59,8	3,7	6,2	8,0	ok	fechada
Mistura 5	2,36	60,9	4,7	7,7	5,5	+ úmida	bem fechada
Mistura lav.5	2,42	60,2	4,4	7,4	6,0	seca	fechada

Quanto à energia, verificou-se, por meio do tempo de vibro-compressão, que as misturas com areia de britagem lavada não diminuíram significativamente a energia demandada pelo equipamento, como se observa na Tabela 46. No caso da mistura 5, particularmente, este valor aumentou, fato este ocorrido, provavelmente, devido a diferença de umidade de uma mistura para a outra. Já em relação à aparência das peças, nota-se que, no caso do emprego da areia lavada, as peças produzidas encontravam-se mais secas do que as com areia não lavada, e com menor coesão.

Na Tabela 46, observa-se, também, que as resistências médias à compressão das misturas com areia de britagem lavada, quando comparadas com suas respectivas misturas de areia não lavada, não aumentaram significativamente, conforme esperado. Elas se mantiveram, praticamente, constantes. Uma explicação para este fato pode estar relacionada à diferença no lote de cimento utilizado nas misturas não lavadas e nas misturas lavadas.

b) Teor de vazios nas PCP estudadas

A quantidade de vazios em uma PCP é resultado da diferença do volume de sólidos pelo volume da peça. Estes vazios podem ser preenchidos por água ou formarem poros dentro da peça. Através de cálculos do teor de vazios, bem como do volume de sólidos e da quantidade de água das peças moldadas pelas misturas estudadas, verificou-se que, para as misturas compostas por areia de britagem (tanto lavada quanto não lavada), praticamente todos os pontos possuíam um teor de sólidos mais água muito próximo ou igual a 100%. Isso significa que, todo ou quase todo o volume da peça está ocupado por água + materiais secos, ou seja, não há mais vazios a serem preenchidos. Com isso, independente da quantidade de água adicionada

à mistura ou do tempo de prensagem da peça, sua resistência não aumenta, pois não há como deixá-la mais compacta. Deste ponto em diante, o aumento da quantidade de água não auxilia mais no acréscimo da resistência à compressão da peça, mas faz com que se forme o “borrachudo”. Estes valores encontrados podem ser visualizados, de forma concentrada, na Tabela 47. No ANEXO IV, encontra-se detalhado o procedimento de cálculo para a determinação destes valores de volume de sólidos e volume de sólidos +água utilizado para todas as misturas estudadas. Alguns valores ultrapassaram 100% porque, nos cálculos, não foi considerada a parcela de água absorvida pelos agregados.

Tabela 47: Volume de sólidos e sólidos+água das PCP com as misturas estudadas.

Misturas	Volume sólidos (%)		Volume sólidos +água (%)	
	Ponto mínimo	Ponto máximo	Ponto mínimo	Ponto máximo
Mistura 1	75,77	83,08	90,94	99,72
Misura 2	77,78	83,86	92,42	99,65
Mistura 3	77,78	85,50	93,09	102,33
Misura 4	77,76	81,97	96,83	100,58
Mistura 5	79,48	82,35	94,10	97,08
Misura lav. 4	80,70	84,69	95,54	100,26
Mistura lav. 5	80,65	85,54	93,28	98,95

Outra observação importante da Tabela 47, é que, após a lavação da areia de britagem, as peças produzidas obtiveram um maior volume de sólidos, ou seja, as peças ficaram mais compactas, porém, como visto anteriormente, não houve um acréscimo da resistência à compressão, apesar desse aumento de compacidade. Nota-se, também, nos resultados, que para os traços com areia de britagem foi mais acentuado, mas que em todas as misturas empregadas para a fabricação de PCP de 50Mpa trabalha-se muito próximo ao valor máximo (100%) de volume de sólidos+ água, tornando, assim, a dosagem para este tipo de pavimento, peculiar. Com isso, algumas regras que funcionam para as PCP de 35Mpa, nem sempre funcionam para os PCP de 50MPa. Exemplos desta diferença são alguns aspectos vistos ao longo deste trabalho como: o aumento da quantidade de água aumentando a resistência à compressão da peça, bem como o aumento do consumo de cimento. Por isso, a fabricação destas peças se torna um processo menos trivial e alguns cuidados adicionais devem ser tomados.

6.3 RELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS-DE-PROVA E DAS PCP

Um dos objetivos da segunda parte deste programa experimental foi o de avaliar a relação existente entre as características das PCP moldadas em fábrica com os equipamentos de vibro-compressão e os corpos-de-prova moldados em laboratório, com a mesma mistura, através do soquete de compactação. Com isso pretende-se estabelecer uma forma mais rápida e eficaz de prever as resistências à compressão. A importância desta previsão é a de permitir a realização de estudos posteriores com concreto seco em laboratórios, para estimar, satisfatoriamente, a resistência das PCP produzidas por uma vibroprensa.

Para o estudo desta relação, foram adotadas as peças de 80mm de altura produzidas em fábrica e corpos-de-prova cilíndricos 9x8cm, moldados com a mesma mistura em laboratório da própria fábrica.

Conforme pôde ser observado, não se pode prever a resistência à compressão das PCP diretamente através da resistência à compressão dos corpos-de-prova. Visto isso, foram determinadas curvas de correlações entre a resistência dos corpos-de-prova e das suas respectivas PCP. Estas curvas foram separadas em dois grupos: a de misturas com areia natural (Figura 36) e as de areia de britagem (Figura 37). As curvas de correlação entre as resistências tornam possível a estimativa de resistência à compressão das PCP em função da resistência dos corpos-de-prova, desde que moldados com a mesma mistura.

A determinação destas curvas foi feita através da correlação dos valores de resistência a compressão das PCP em função dos valores de massa específica, conforme mostra a Tabela 45. O mesmo foi feito para os corpos-de-prova.

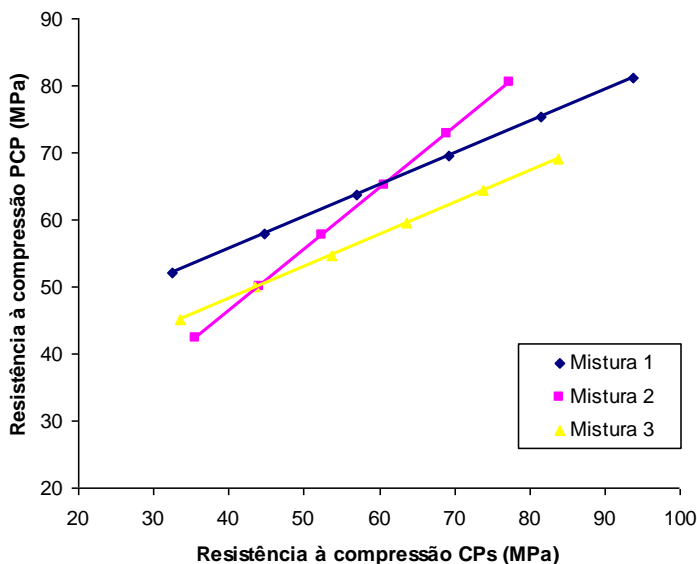


Figura 36: Correlação entre as resistências obtidas em PCP e seus respectivos corpos de prova com misturas de areia natural.

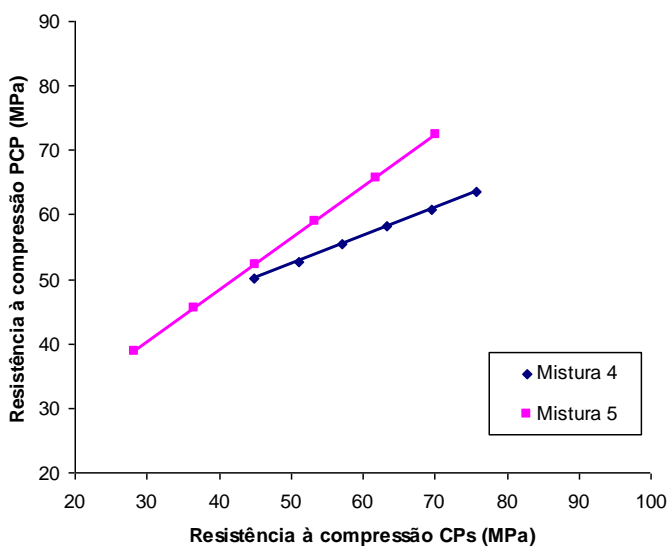


Figura 37: Correlação entre as resistências obtidas em PCP e seus respectivos corpos-de-prova com misturas de areia de britagem.

Além da resistência à compressão, outra característica importante de ser avaliada é a possibilidade do emprego da energia de compactação dos corpos-de-prova como parâmetro para a avaliação da energia demandada para a produção das peças no equipamento de vibro-compressão. Para a avaliação desta energia, no caso dos corpos-de-prova, foi utilizada a quantidade de energia necessária para fechar o mesmo (quantidade de golpes), enquanto que para as PCP esta energia foi avaliada através do tempo necessário de vibro-compressão para a fabricação das peças. A Figura 38 mostra que existe uma boa relação entre estas energias. Percebe-se que as misturas que exigiram menor energia no soquete de compactação foram as mesmas que demandaram menor tempo de vibro-prensagem no equipamento (misturas compostas por areia natural).

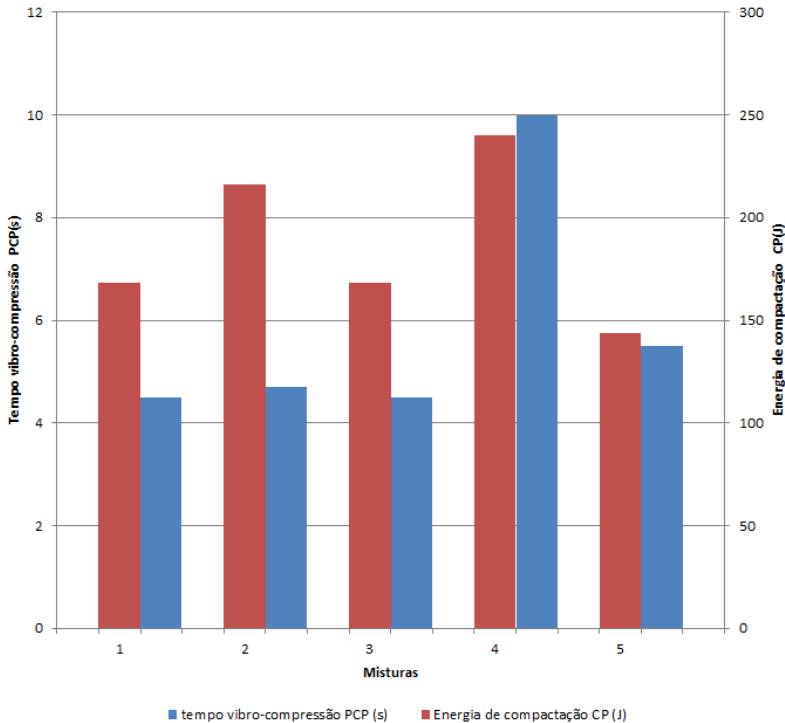


Figura 38: Relação entre as energias obtidas em PCP e seus respectivos corpos-de-prova.

Através do estudo realizado, pode-se prever quantitativamente a relação existente entre as resistências à compressão das PCP e seus corpos-de-prova com mesmas massas específicas e composição de mistura. E, embora não se possa garantir a existência desta mesma relação para misturas e equipamentos com características diferentes, pode-se afirmar que a resistência à compressão dos corpos-de-prova produzidos com soquete de compactação possui uma boa relação qualitativa com suas respectivas PCP. Porém, a determinação quantitativa desta relação, de uma maneira geral, não pode ser realizada, pois, em cada mistura, como visto anteriormente, as peças produzidas se comportaram de maneira diferente, sendo que, em alguns casos, as peças já se encontravam no ponto de borrachudo (mesmo com o aumento do peso, a resistência não aumentava significativamente) enquanto outras ainda adquiriam resistência com o ganho de peso. Contudo, a comprovação quantitativa desta relação permite prever, com confiabilidade, através de estudos em laboratórios as resistências que terão as peças e qual será a facilidade ou dificuldade operacional de produzi-las (energia de prensagem).

6.4 RELAÇÃO CUSTO/RESISTÊNCIA COMPRESSÃO/ PRODUTIVIDADE

A avaliação do custo relativo à matéria-prima consumida e ao equipamento utilizado para a fabricação das PCP, em termos de quantidade de peças produzidas e resistência à compressão obtida, constitui-se em um importante parâmetro comparativo de vantagens técnicas e econômicas. Assim, o aumento do consumo de cimento *versus* uma maior ou menor exigência de demanda de energia do equipamento de vibro-compressão empregados tornam-se fatores determinantes para decisões quanto à viabilidade da produção de PCP de 50MPa.

A Tabela 48 mostra uma avaliação de custos em relação a este binômio resistência x energia. Observa-se que o custo de insumos para a produção de 1m² de PCP de 50MPa com as cinco misturas estudadas são muito parecidos, sendo que as misturas com menor consumo de cimento (misturas 3 e 5) apresentam uma pequena economia que gira em torno de 6% em relação as demais.

Outro dado importante apresentado na Tabela 48 é a diminuição de produtividade gerada pela substituição da areia natural pela areia de britagem nas misturas. Este cálculo de produtividade foi feito levando

em conta o tempo de ciclo de produção das PCP na fábrica com as misturas estudadas. Devido à dificuldade de vibro-compressão das misturas com areia de britagem, houve um aumento considerável deste tempo, fazendo com que o tempo de ciclo aumentasse e consequentemente a produção diária caísse.

Tabela 48: Relação custos de insumos e produtividade no processo produtivo das PCP de 50Mpa.

Traços	Resistência média (MPa)	Custo insumos/m ²	Produtividade (m ² / dia)
Mistura 1	67,2	R\$ 16,57	507
Mistura 2	65,4	R\$ 16,62	486
Mistura 3	63,2	R\$ 15,73	507
Mistura 4	59,4	R\$ 16,20	253
Mistura 5	60,9	R\$ 15,33	405

Diante do exposto, pode-se afirmar que, para as misturas estudadas e com o equipamento de vibro-compressão utilizado, a mistura que apresentou melhores resultados quanto a custo foi a mistura 3. Percebe-se, com isso, que de fato o enriquecimento do traço a partir de um determinado ponto não é mais vantajoso para a empresa fabricante de PCP, visto que o cimento é o insumo com maior valor agregado dentro do processo produtivo e o aumento de seu consumo implica num aumento significativo de custo, sem, necessariamente, o aumento da resistência mecânica adquirida.

Vale ressaltar, ainda, que, apesar da significativa diferença de preço da areia de britagem para a areia natural média, sendo a primeira em torno de 29% inferior a segunda, a perda de produtividade com o uso desta areia de britagem é maior do que a economia gerada pela diferença de preço desta para a areia natural como matéria-prima (atualmente no mercado da grande Florianópolis e areia média natural custa em torno de R\$24,70/ton. enquanto que a areia de britagem R\$19,20/ton.).

Outra observação importante a se fazer foi quanto à falta de dados para o cálculo do custo de produção das misturas que empregaram areia de britagem lavada, pois, atualmente no mercado não há o oferecimento deste tipo de produto, sendo o processo de lavagem da areia feito manualmente para este estudo. Assim sendo, em termos de custos, não é possível se afirmar que a utilização de areia de britagem lavada é considerada lucrativa na produção de PCP de 50MPa.

Entende-se, portanto, com base nos resultados dos estudos realizados neste trabalho que, em termos econômicos, a areia natural média constitui-se como melhor solução para a produção de PCP de 50MPa. Porém, entende-se que mais estudos devam ser realizados afim de ratificar esta afirmação.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Com base no exposto ao longo desta dissertação, são apresentadas, a seguir, algumas conclusões obtidas. Cabe salientar que tais conclusões devem ser limitadas aos tipos de matérias-primas e equipamentos avaliados, disponíveis na região da grande Florianópolis.

Conforme já mencionado, este trabalho teve como objetivo esclarecer melhor as variáveis envolvidas no processo de fabricação de PCP de 50MPa vista a carência de estudos na área. Além disso, buscou-se mostrar como características ligadas ao processo produtivo podem interferir na resistência à compressão das peças.

Os estudos realizados no presente trabalho mostraram:

- A possibilidade da utilização dos resultados de energia de compactação e resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados em laboratório como previsão destas mesmas características para as peças produzidas em fábrica. Com a comprovação desta relação, viabilizam-se estudos mais dinâmicos e menos onerosos em concretos secos. Porém, características diferentes das estudadas podem gerar relações diferentes ou alterar este resultado.
- A importância do ajuste dos agregados empregados em concreto seco. Percebe-se que tão importante quanto aumentar o consumo de cimento numa mistura para a produção de PCP de 50MPa é a utilização de agregados adequados. Deve empregar a maior quantidade possível de agregado graúdo, desde que não prejudique a textura da peça e uma composição de agregados miúdos que forneça o melhor empacotamento dos grãos, tornando a peça com uma boa aparência, com bastante compacidade e, conseqüentemente, com maior resistência mecânica. Misturas com maiores teores de pedrisco do que os utilizados pelas fábricas atualmente, produziram peças com maior resistência mecânica e com boa textura. As maiores resistências à compressão neste trabalho foram obtidas com misturas com teores de pedrisco de 24%. Acredita-se que isso acontece devido a menor superfície específica do

agregado total o que torna mais eficiente o envolvimento destes grãos pela pasta de cimento durante o processo produtivo das PCP.

- A substituição de areia natural por areia de britagem, no caso da fabricação de PCP de 50MPa, mostrou-se ineficiente, visto que as misturas que empregaram areia de britagem além de não apresentaram uma melhor resistência à compressão das peças, demandaram maior energia de compactação dos equipamentos, diminuindo, assim, a produtividade dos mesmos.

- Com a lavagem da areia de britagem houve uma diminuição da energia demandada pela máquina para a compactação das peças, porém, não houve um aumento significativo da resistência à compressão, tornando a opção da utilização de areia de britagem, mesmo lavada, menos eficiente que a utilização de areia natural para a fabricação de PCP de 50Mpa. Esta constatação, entretanto, precisa ser confirmada em estudos posteriores, pois, como já foi relatado, os testes foram feitos em dias distintos e com partidas de cimento diferentes o que pode ter comprometido esta comparação.

- A umidade apresentou-se como uma variável de extrema importância na fabricação de PCP, como esperado. Principalmente no caso das PCP de 50MPa, onde o teor de finos é mais alto, devido à utilização de traços mais ricos, deve-se ter um cuidado especial com a quantidade de água empregada. A quantidade de água deve ser a máxima possível, desde que não haja o aparecimento dos borrachudos. Um bom parâmetro para a avaliação da quantidade ideal é a apresentação de gotículas de água no topo dos corpos-de-prova. Acima deste ponto, a umidade passa a prejudicar o ganho de resistência.

- Mostrou-se que o aumento do consumo de cimento nem sempre ocasiona o aumento da resistência à compressão das PCP. Assim, como para a umidade, existe um ponto ótimo onde a partir deste não há mais ganho de resistência.

- Em termos de custos, o emprego da areia natural se mostrou mais vantajoso para fabricação de PCP de 50MPa. O traço mais racional para alcance da resistência foi o traço unitário de 1:4, com os equipamentos estudados. Porém, este valor depende do equipamento empregado.

De forma geral, com o que foi aqui mostrado, espera-se ter contribuído para a ampliação do conhecimento científico das propriedades dos concretos “secos” utilizados na fabricação de PCP de 50MPa, fornecendo parâmetros para controle de qualidade das referidas peças para garantir o atendimento dos requisitos preconizados pelas

normas vigentes. Lembra-se que, novas pesquisas devem ser realizadas a fim de aprimorar e ratificar algumas das conclusões extraídas deste trabalho.

Como sugestões de continuidade de outros estudos relacionados ao tema abordado neste trabalho, propõem-se:

- Avaliação do comportamento de concreto seco empregado para fabricação de PCP de 50MPa quanto a sua microestrutura;
- Estudo da influência nas propriedades do concreto seco com diferentes tipos de aditivos nas misturas;
- Realização de novos estudos, com diferentes maquinários, e matérias-primas para determinar, quantitativamente, a correlação entre corpos-de-prova 9x8cm e suas respectivas PCP;
- Estudos mais aprofundados a respeito do aparecimento de “borrachudos”.

8. REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: www.abcp.org.br. Acessado em: jan. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aditivos para concreto de cimento Portland – Especificações**. NBR 11768. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **Agregados para concreto**. NBR 7211, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio**. NBR 9780, Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Peças de concreto para pavimentação – Especificação**. NBR 9781, Rio de Janeiro, 1987.

_____. **Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. NBR 5733, Rio de Janeiro, 1991.

_____. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Preparo, controle e recebimento de concreto**. NBR 12655, Rio de Janeiro, 1992.

BARFOOT, J. **More pavers of quality for more money**. Concrete, September, 1988.

BLOCO BRASIL. Disponível em: blocobrasil.com.br. Acessado em: jan. 2011

BRESSON, J.. **La Vibration des bétons**. CERIB – Publication technique, 2001.

FERREIRA JUNIOR, S. **Peças de concreto para pavimentação**. 25º Reunião Anual de Pavimentação. São Paulo, 1991.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2000.

HALLACK A. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1998.

HOLDERCIM. **Piso Intertravado de Concreto – Produção e Utilização**. Santo André, 2000.

JUVAS, K.. Very dry precasting concrete. In: **Special Concretes: Workability and Mixing**. Proceedings of the International. RILEM Workshop, London, 1993.

MADRID, G. Rodovias com intertravados já são realidade. **Revista Prisma** v.10, mar. 2004.

MARCHAND, J.; HORNAIN, H.; DIAMOND, S.; PIGEON, M.; GUIRAUD, H. **The microstructure of dry concrete products**. Cement and Concrete Research, 1996.

MEDEIROS, J.S.. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto**: produção de componentes e parâmetros de projeto.1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1993.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. – **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador Eugênio Giamusso. São Paulo: Pini, 1997

OLIVEIRA, A.L. **Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2004.

PRUDÊNCIO JR, L.R.; OLIVEIRA, A.L.; FRASSON JR, A. Metodologia de dosagem para blocos de concreto empregados em alvenaria estrutural. **Revista Prisma**, v. 25 e 26. Florianópolis, 2008.

PRUDÊNCIO JR, L.R., **Materiais de Construção Civil I**. Apostila curso mestrado em Engenharia Civil. Florianópolis, 2007.

POON C.S., CHAN D. **Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick**. Construction and Building Materials, 2006.

RODRIGUES, P.P.F. **Estágio atual da pavimentação intertravada no Brasil**. In: 4º Seminário sobre normalização de cimento, concreto e agregados. São Paulo, IBRACON, 1986.

RODRIGUES, P.P.F..**Recomendações para a fabricação de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação.** In: Reunião Anual, São Paulo, IBRACON, 1984.

TANGO, C.E.S.. **Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais.** 5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Florianópolis, 1994.

ANEXOS

ANEXO I

Tabelas com os traços unitários, teores de sólidos e quantidade de material por virada empregadas na 1ª etapa do programa experimental.

**Tabela A1: Traço unitário, quantidade de material por virada,
%sólidos para traço P16 AN 20-80**

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	2,016	0,504	0,48	881,09	1.776,29	444,07	422,93
	80%					892,25	1.798,77	449,69	428,28
3,50	79%	1	2,352	0,588	0,56	780,27	1.835,20	458,80	436,95
	80%					790,15	1.858,43	464,61	442,48
4,00	79%	1	2,688	0,672	0,64	700,15	1.882,01	470,50	448,10
	80%					709,02	1.905,84	476,46	453,77

**Tabela A2: Traço unitário, quantidade de material por virada,
%sólidos para traço P16 AN 30-70**

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,764	0,756	0,48	881,95	1.555,75	666,75	423,33
	80%					893,11	1.575,45	675,19	428,69
3,50	79%	1	2,058	0,882	0,56	781,05	1.607,40	688,89	437,39
	80%					790,94	1.627,75	697,61	442,93
4,00	79%	1	2,352	1,008	0,64	700,87	1.648,45	706,48	448,56
	80%					709,74	1.669,32	715,42	454,24

**Tabela A3: Traço unitário, quantidade de material por virada,
%sólidos para traço P20 AN 20-80**

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,92	0,48	0,60	881,52	1.692,52	423,13	528,91
	80%					892,68	1.713,94	428,49	535,61
3,50	79%	1	2,24	0,56	0,70	780,66	1.748,68	437,17	546,46
	80%					790,54	1.770,82	442,7	553,38
4,00	79%	1	2,56	0,64	0,80	700,51	1.793,31	448,33	560,41
	80%					709,38	1.816,01	454,00	567,50

**Tabela A4: Traço unitário, quantidade de material por virada,
%sólidos para traço P20 AN 30-70**

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,68	0,72	0,60	882,33	1.482,32	635,28	529,40
	80%					893,50	1.501,08	643,32	536,10
3,50	79%	1	1,96	0,84	0,70	781,41	1.531,55	656,38	546,98
	80%					791,30	1.550,94	664,69	553,91
4,00	79%	1	2,24	0,96	0,80	701,20	1.570,68	673,15	560,96
	80%					710,07	1.590,56	681,67	568,06

**Tabela A5: Traço unitário, quantidade de material por virada,
%sólidos para traço P24 AN 20-80**

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,824	0,456	0,72	881,95	1.608,67	402,17	635
	80%					893,11	1.629,04	407,26	643,04
3,50	79%	1	2,128	0,532	0,84	781,05	1.662,08	415,52	656,08
	80%					790,94	1.683,12	420,78	664,39
4,00	79%	1	2,432	0,608	0,96	700,87	1.704,52	426,13	672,84
	80%					709,74	1.726,10	431,52	681,35

**Tabela A6 : Traço unitário, quantidade de material por virada,
%sólidos para traço P24 AN 30-70**

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Natural Grossa	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,596	0,684	0,72	882,72	1.408,82	603,78	635,56
	80%					893,89	1.426,66	611,42	643,6
3,50	79%	1	1,862	0,798	0,84	781,76	1.455,64	623,84	656,68
	80%					791,66	1.474,06	631,74	664,99
4,00	79%	1	2,128	0,912	0,96	701,52	1.492,84	639,79	673,46
	80%					710,40	1.511,74	647,89	681,99

Tabela A7: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P16 AA 20-80

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Artificial não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Britagem não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	2,136	0,504	0,48	881,09	1.882,06	444,07	422,93
	80%					892,25	1.905,88	449,69	428,28
3,50	79%	1	2,492	0,588	0,56	780,27	1.944,48	458,80	436,95
	80%					790,15	1.969,09	464,61	442,48
4,00	79%	1	2,848	0,672	0,64	700,15	1.994,08	470,50	448,10
	80%					709,02	2.019,32	476,46	453,77

Tabela A8: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P16 AA 30-70

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Artificial não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Britagem não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,869	0,756	0,48	881,95	1.648,39	666,75	423,33
	80%					893,11	1.669,26	675,19	428,69
3,50	79%	1	2,181	0,882	0,56	781,05	1.703,12	688,89	437,39
	80%					790,94	1.724,68	697,61	442,93
4,00	79%	1	2,492	1,008	0,64	700,87	1.746,61	706,48	448,56
	80%					709,74	1.768,72	715,42	454,24

Tabela A9: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P20 AA 20-80

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Artificial não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Britagem não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	2,034	0,48	0,60	881,52	1.793,30	423,13	528,91
	80%					892,68	1.816,00	428,49	535,61
3,50	79%	1	2,373	0,56	0,70	780,66	1.852,81	437,17	546,46
	80%					790,54	1.876,26	442,7	553,38
4,00	79%	1	2,712	0,64	0,80	700,51	1.900,10	448,33	560,41
	80%					709,38	1.924,15	454,00	567,50

Tabela A10: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P20 AA 30-70

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Articial não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Britagem não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,78	0,72	0,60	882,33	1.570,59	635,28	529,40
	80%					893,50	1.590,47	643,32	536,10
3,50	79%	1	2,077	0,84	0,70	781,41	1.622,75	656,38	546,98
	80%					791,30	1.643,29	664,69	553,91
4,00	79%	1	2,373	0,96	0,80	701,20	1.664,21	673,15	560,96
	80%					710,07	1.685,28	681,67	568,06

Tabela A11: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P24 AA 20-80

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Articial não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Britagem não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,933	0,456	0,72	881,95	1.704,46	402,17	635,00
	80%					893,11	1.726,04	407,26	643,04
3,50	79%	1	2,255	0,532	0,84	781,05	1.761,05	415,52	656,08
	80%					790,94	1.783,34	420,78	664,39
4,00	79%	1	2,577	0,608	0,96	700,87	1.806,02	426,13	672,84
	80%					709,74	1.828,88	431,52	681,35

Tabela A12: Traço unitário, quantidade de material por virada, %sólidos para traço P24 AA 30-70

TRAÇO	%SOL.	Traço unitário				Quantidade por virada (g)			
		Cimento	Areia Articial não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco	Cimento	Areia Britagem não lavada	Areia Natural Fina	Pedrisco
3,00	79%	1	1,691	0,684	0,72	882,72	1.492,71	603,78	635,56
	80%					893,89	1.511,61	611,42	643,6
3,50	79%	1	1,973	0,798	0,84	781,76	1.542,31	623,84	656,68
	80%					791,66	1.561,84	631,74	664,99
4,00	79%	1	2,255	0,912	0,96	701,52	1.581,73	639,79	673,46
	80%					710,40	1.601,76	647,89	681,99

ANEXO II

Valores de resistência à compressão e de energia de compactação dos corpos-de-prova 9x8cm da 1ª etapa do programa experimental.

Tabela A13: Valores de resistência à compressão e energia de compactação.

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	Iméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P16 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 1	82,61	80,00	78,45	78,8	90,5	348,5	54,8	54,2	3,4	6,2	9	216	248	27,7	11,2
P16 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 2	82,45	80,00	78,59		90,6	322,0	50,6				11	264			
P16 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,73	80,00	79,29		90,3	364,5	57,3				11	264			
P16 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 1	82,30	80,00	78,74	78,4	90,6	332,5	52,3	49,5	2,4	4,9	9	216	248	27,7	11,2
P16 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 2	82,67	80,00	78,39		90,4	304,0	47,8				11	264			
P16 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 3	82,91	80,00	78,16		90,6	307,5	48,3				11	264			
P16 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 1	82,01	80,00	79,01	78,7	90,5	322,0	50,6	47,2	4,8	10,2	8	192	192	0,0	0,0
P16 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 2	82,21	80,00	78,82		90,9	278,5	43,8				8	192			
P16 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 3	82,96	80,00	78,11		90,5	243,5	38,3				8	192			
P16 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 1	81,73	80,00	79,29	78,8	90,7	363,0	57,1	52,3	4,3	8,3	6	144	152	13,9	9,1
P16 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 2	82,49	80,00	78,56		90,6	327,0	51,4				6	144			
P16 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 3	82,60	80,00	78,45		90,9	309,0	48,6				7	168			
P16 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,63	80,00	79,39	79,3	90,4	317,0	49,8	47,3	2,2	4,7	8	192	208	13,9	6,7
P16 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 2	81,65	80,00	79,36		90,3	291,5	45,8				9	216			
P16 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,75	80,00	79,27		90,3	294,0	46,2				9	216			
P16 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 1	81,69	80,00	79,32	79,1	90,6	344,5	54,2	48,1	5,3	11,1	8	192	192	0,0	0,0
P16 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 2	82,34	80,00	78,70		90,3	292,5	46,0				8	192			
P16 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 3	81,74	80,00	79,28		90,3	281,0	44,2				10	240			
P16 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,88	79,00	78,16	77,9	90,4	331,5	52,1	46,3	5,1	11,0	8	192	208	13,9	6,7
P16 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 2	82,25	79,00	77,80		90,1	281,5	44,2				9	216			
P16 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 3	82,40	79,00	77,66		90,5	271,0	42,6				9	216			
P16 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 1	81,37	79,00	78,65	78,3	90,2	343,0	53,9	50,5	3,0	5,9	6	144	156	17,0	10,9
P16 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 2	81,85	79,00	78,18		90,3	313,5	49,3				7	168			
P16 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 3	82,04	79,00	78,00		90,3	308,0	48,4				8	192			
P16 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 1	82,22	79,00	77,83	77,92	90,3	259,5	40,8	42,91	3,0	6,9	6	144	152	13,9	9,1
P16 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 2	82,32	79,00	77,74		90,3	221,5	34,8				6	144			
P16 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,85	79,00	78,18		90,3	286,5	45,0				7	168			
P16 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 1	81,99	79,00	78,05	78,15	90,3	340,0	53,4	48,34	4,5	9,3	5	120	136	13,9	10,2
P16 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 2	82,21	79,00	77,84		90,4	285,5	44,9				6	144			
P16 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 3	81,46	79,00	78,56		90,3	297,0	46,7				6	144			
P16 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,64	79,00	78,39	78,16	90,0	240,0	37,7	40,16	3,4	8,6	8	192	208	13,9	6,7
P16 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,56	79,00	78,46		90,3	271,0	42,6				9	216			
P16 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 3	82,41	79,00	77,65		90,1	181,0	28,5				9	216			
P16 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 1	81,03	79,00	78,98	79,05	90,3	328,0	51,6	49,28	2,8	5,6	5	120	120	0,0	0,0
P16 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 2	81,00	79,00	79,00		90,3	294,0	46,2				5	120			
P16 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 3	80,84	79,00	79,16		90,5	318,5	50,1				5	120			
P16 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 1	82,80	80,00	78,26	77,95	90,2	257,5	40,5	43,03	3,6	8,4	8	192	184	13,9	7,5
P16 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 2	83,45	80,00	77,65		90,3	209,0	32,9				7	168			
P16 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 3	83,13	80,00	77,95		90,2	290,0	45,6				8	192			
P16 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 1	81,99	80,00	79,04	78,62	90,6	356,5	56,0	52,79	3,3	6,3	8	192	204	17,0	8,3
P16 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 2	82,58	80,00	78,47		90,2	336,5	52,9				7	168			
P16 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 3	82,72	80,00	78,34		90,3	314,5	49,4				9	216			
P16 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 1	82,22	80,00	78,82	78,94	90,4	364,5	57,3	53,08	0,4	0,7	6	144	204	17,0	8,3
P16 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,53	80,00	79,48		90,5	361,0	56,7				8	192			
P16 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 3	82,53	80,00	78,52		90,7	284,0	44,6				9	216			
P16 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 1	82,42	80,00	78,62	78,72	90,8	349,0	54,9	51,85	4,1	7,9	8	192	180	17,0	9,4
P16 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 2	82,26	80,00	78,78		90,6	300,0	47,2				9	216			
P16 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 3	82,28	80,00	78,76		90,9	340,5	53,5				7	168			
P16 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 1	82,30	80,00	78,74	78,13	90,7	299,0	47,0	40,92	5,4	13,1	7	168	160	13,9	8,7
P16 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 2	83,26	80,00	77,83		90,6	247,5	38,9				6	144			
P16 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 3	83,28	80,00	77,81		90,7	234,5	36,9				7	168			
P16 AN30-70 (A) 4,0 (8,0%) 1	82,36	80,00	78,68	78,47	90,8	286,5	45,0	43,23	4,0	9,4	8	192	184	13,9	7,5
P16 AN30-70 (A) 4,0 (8,0%) 2	82,41	80,00	78,64		91,0	293,0	46,1				7	168			
P16 AN30-70 (A) 4,0 (8,0%) 3	82,98	80,00	78,10		91,3	245,5	38,6				8	192			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	lméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P16 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,39	79,00	78,63	78,31	90,5	338,5	53,2	50,77	2,5	5,0	8	192	184	13,9	7,5
P16 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,68	79,00	78,35		90,2	324,0	50,9				7	168			
P16 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 3	82,08	79,00	77,97		90,3	306,5	48,2				8	192			
P16 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 1	82,30	79,00	77,76	77,67	90,2	332,5	52,3	48,76	4,0	8,3	6	144	152	13,9	9,1
P16 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 2	82,93	79,00	77,17		90,2	282,0	44,3				6	144			
P16 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 3	81,96	79,00	78,08		90,4	316,0	49,7				7	168			
P16 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 1	82,78	79,00	77,30	77,33	90,6	230,5	36,2	41,14	6,9	16,9	8	192	208	13,9	6,7
P16 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,89	79,00	78,15		90,4	293,0	46,1				9	216			
P16 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 3	83,60	79,00	76,55		90,4	168,5	26,5				9	216			
P16 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 1	81,87	79,00	78,16	78,08	90,3	343,0	53,9	49,99	3,6	7,1	6	144	152	13,9	9,1
P16 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 2	81,94	79,00	78,10		90,3	312,0	49,0				7	168			
P16 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 3	82,07	79,00	77,97		90,4	299,0	47,0				6	144			
P16 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,40	79,00	78,61	78,60	90,3	317,5	49,9	47,08	2,6	5,6	5	120	128	13,9	10,8
P16 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,46	79,00	78,55		90,5	284,5	44,7				5	120			
P16 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,38	79,00	78,64		90,3	296,5	46,6				6	144			
P16 AN30-70 (B) 4,0 (8,0%) 1	81,52	79,00	78,50	78,42	90,3	290,5	45,7	46,03	1,6	3,5	7	168	160	13,9	8,7
P16 AN30-70 (B) 4,0 (8,0%) 2	81,79	79,00	78,24		90,4	284,0	44,6				6	144			
P16 AN30-70 (B) 4,0 (8,0%) 3	81,52	79,00	78,50		90,6	304,0	47,8				7	168			
P20 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 1	82,84	80,00	78,22	78,70	90,2	286,0	45,0	51,58	5,7	11,1	7	168	184	27,7	15,1
P20 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 2	82,22	80,00	78,82		90,5	348,0	54,7				7	168			
P20 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,95	80,00	79,07		90,3	350,5	55,1				9	216			
P20 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 1	81,91	80,00	79,12	79,03	90,7	401,0	63,0	60,10	2,5	4,2	7	168	200	27,7	13,9
P20 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 2	81,89	80,00	79,13		90,7	373,0	58,6				9	216			
P20 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 3	82,18	80,00	78,85		90,8	373,0	58,6				9	216			
P20 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,22	80,00	79,79	79,34	90,1	394,0	61,9	57,35	4,3	7,6	11	264	240	33,9	14,1
P20 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,61	80,00	79,40		90,9	361,5	56,8				9	216			
P20 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 3	82,20	80,00	78,84		90,6	339,0	53,3				8	192			
P20 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 1	80,97	80,00	80,03	79,60	90,8	365,0	57,4	56,51	0,8	1,4	7	168	160	13,9	8,7
P20 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 2	81,72	80,00	79,30		91,0	355,0	55,8				6	144			
P20 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 3	81,55	80,00	79,47		90,4	358,5	56,4				7	168			
P20 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,79	80,00	79,23	79,13	90,6	346,5	54,5	51,85	2,3	4,5	6	144	156	17,0	10,9
P20 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 2	82,04	80,00	78,99		90,5	325,0	51,1				5	120			
P20 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,85	80,00	79,17		90,6	318,0	50,0				7	168			
P20 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 1	80,81	80,00	80,19	80,05	90,3	339,0	53,3	55,65	3,2	5,7	7	168	176	13,9	7,9
P20 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 2	80,46	80,00	80,54		91,7	377,0	59,3				8	192			
P20 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 3	81,59	80,00	79,43		90,4	346,0	54,4				7	168			
P20 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,28	79,00	78,73	78,24	90,5	358,0	56,3	52,82	4,9	9,2	7	168	184	13,9	7,5
P20 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 2	82,47	79,00	77,59		90,4	259,5	40,8				8	192			
P20 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,63	79,00	78,40		90,5	314,0	49,4				8	192			
P20 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 1	81,57	79,00	78,45	78,59	90,2	379,5	59,7	56,85	3,5	6,2	6	144	156	17,0	10,9
P20 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 2	81,50	79,00	78,52		90,5	336,5	52,9				7	168			
P20 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 3	81,22	79,00	78,79		90,4	369,0	58,0				8	192			
P20 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,75	79,00	78,28	78,35	90,9	334,0	52,5	52,95	1,1	2,0	7	168	152	13,9	9,1
P20 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,67	79,00	78,36		90,8	344,5	54,2				6	144			
P20 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,61	79,00	78,41		90,8	332,0	52,2				6	144			
P20 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 1	81,25	79,00	78,76	78,73	90,5	385,5	60,6	57,37	3,5	6,2	5	120	128	13,9	10,8
P20 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 2	81,26	79,00	78,75		90,9	368,5	57,9				6	144			
P20 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 3	81,34	79,00	78,67		90,0	341,0	53,6				5	120			
P20 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,54	79,00	78,48	78,46	91,0	339,0	53,3	50,72	2,5	5,0	6	144	144	0,0	0,0
P20 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,65	79,00	78,37		90,9	322,0	50,6				6	144			
P20 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,51	79,00	78,51		90,4	307,0	48,3				6	144			
P20 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 1	81,73	79,00	78,30	78,27	90,4	292,5	46,0	47,45	1,4	2,9	4	96	144	0,0	0,0
P20 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 2	81,85	79,00	78,18		91,1	303,0	47,6				6	144			
P20 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 3	81,69	79,00	78,34		91,0	310,0	48,7				6	144			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	lméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P20 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 1	81,87	80,00	79,15	79,16	90,7	395,0	62,1	61,38	1,0	1,7	11	264	288	24,0	8,3
P20 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,83	80,00	79,19		90,7	393,5	61,9				13	312			
P20 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,89	80,00	79,13		90,9	383,0	60,2				12	288			
P20 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 1	81,94	80,00	79,08	78,83	90,8	317,5	49,9	52,53	4,5	8,5	19	456	420	50,9	12,1
P20 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 2	82,47	80,00	78,57		90,9	318,0	50,0				16	384			
P20 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 3	82,21	80,00	78,83		90,8	367,0	57,7				9	216			
P20 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 1	82,12	80,00	78,91	79,19	90,5	375,0	58,9	59,00	0,6	0,9	7	168	168	0,0	0,0
P20 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,92	80,00	79,10		90,6	372,0	58,5				7	168			
P20 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,44	80,00	79,57		90,4	379,0	59,6				9	216			
P20 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 1	82,09	80,00	78,94	79,01	90,7	357,0	56,1	53,76	2,3	4,2	7	168	216	33,9	15,7
P20 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 2	81,91	80,00	79,11		90,8	328,0	51,6				10	240			
P20 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 3	82,06	80,00	78,97		90,7	341,0	53,6				8	192			
P20 AN30-70 (A) 4,0 (7,0%) 1	82,53	80,00	78,52	79,15	90,3	285,0	44,8	50,59	5,1	10,2	8	192	184	13,9	7,5
P20 AN30-70 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,44	80,00	79,57		90,6	347,5	54,6				7	168			
P20 AN30-70 (A) 4,0 (7,0%) 3	81,65	80,00	79,36		90,5	333,0	52,3				8	192			
P20 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 1	82,08	80,00	78,95	78,87	90,4	333,0	52,3	54,39	2,9	5,3	8	192	204	17,0	8,3
P20 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 2	81,86	80,00	79,16		90,7	359,0	56,4				9	216			
P20 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 3	82,54	80,00	78,51		90,8	287,5	45,2				7	168			
P20 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,47	79,00	78,54	78,36	90,0	373,0	58,6	57,11	3,2	5,6	7	168	160	13,9	8,7
P20 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,94	79,00	78,09		90,6	377,0	59,3				7	168			
P20 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,58	79,00	78,44		90,6	340,0	53,4				6	144			
P20 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 1	82,61	79,00	77,46	78,04	90,4	342,5	53,8	58,24	3,8	6,5	6	144	204	17,0	8,3
P20 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 2	81,79	79,00	78,24		90,8	384,5	60,4				9	216			
P20 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 3	81,59	79,00	78,43		91,0	384,5	60,4				8	192			
P20 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,32	79,00	78,69	78,55	90,8	377,0	59,3	55,30	3,4	6,2	5	120	120	0,0	0,0
P20 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,46	79,00	78,56		91,1	340,0	53,4				5	120			
P20 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,62	79,00	78,41		90,6	338,5	53,2				7	168			
P20 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 1	81,23	79,00	78,78	78,72	90,8	368,0	57,8	56,61	1,2	2,1	4	96	96	0,0	0,0
P20 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 2	81,35	79,00	78,67		90,8	353,0	55,5				4	96			
P20 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 3	81,29	79,00	78,72		90,9	359,5	56,5				5	120			
P20 AN30-70 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,41	79,00	78,61	78,46	90,7	298,5	46,9	43,23	5,2	12,1	7	168	168	0,0	0,0
P20 AN30-70 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,71	79,00	78,32		90,3	251,5	39,5				7	168			
P20 AN30-70 (B) 4,0 (7,0%) 3	-	-	-		-	-	-				7	168			
P20 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,41	79,00	78,61	78,13	90,3	338,5	53,2	46,97	5,4	11,5	6	144	152	13,9	9,1
P20 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 2	82,07	79,00	77,98		90,3	281,0	44,2				7	168			
P20 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 3	82,23	79,00	77,82		90,4	277,0	43,5				6	144			
P24 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 1	81,91	80,00	79,11	79,28	90,5	407,0	64,0	61,28	2,6	4,2	7	168	228	17,0	7,4
P24 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,73	80,00	79,29		90,4	374,5	58,9				10	240			
P24 AN20-80 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,58	80,00	79,44		90,3	388,0	61,0				9	216			
P24 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 1	81,81	80,00	79,21	79,40	90,5	389,5	61,2	64,97	3,5	5,4	10	240	240	0,0	0,0
P24 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 2	81,42	80,00	79,59		90,6	434,0	68,2				10	240			
P24 AN20-80 (A) 3,0 (8,0%) 3	81,62	80,00	79,40		90,3	416,5	65,5				10	240			
P24 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,03	80,00	79,97	79,69	90,6	400,0	62,9	61,25	3,2	5,2	5	120	132	17,0	12,9
P24 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,17	80,00	79,83		90,7	402,5	63,3				6	144			
P24 AN20-80 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,74	80,00	79,28		90,6	366,5	57,6				8	192			
P24 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 1	81,64	80,00	79,38	79,32	90,8	366,0	57,5	55,44	1,8	3,3	7	168	176	13,9	7,9
P24 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 2	81,47	80,00	79,54		90,6	344,0	54,1				7	168			
P24 AN20-80 (A) 3,5 (8,0%) 3	81,98	80,00	79,04		90,9	348,0	54,7				8	192			
P24 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,57	80,00	79,44	79,64	90,3	320,0	50,3	53,26	2,9	5,5	5	120	120	0,0	0,0
P24 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 2	80,98	80,00	80,02		90,4	357,5	56,2				8	192			
P24 AN20-80 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,55	80,00	79,47		90,6	339,0	53,3				5	120			
P24 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 1	81,04	80,00	79,96	79,96	91,3	387,5	60,9	59,50	1,2	2,1	3	72	72	0,0	0,0
P24 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 2	81,07	80,00	79,94		90,7	373,0	58,6				3	72			
P24 AN20-80 (A) 4,0 (8,0%) 3	81,03	80,00	79,98		90,1	375,0	58,9				5	120			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	lméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P24 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,58	79,00	78,44	78,36	90,5	384,5	60,4	60,13	1,9	3,2	7	168	216	0,0	0,0
P24 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,70	79,00	78,32		90,7	393,5	61,9				9	216			
P24 AN20-80 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,71	79,00	78,32		90,4	369,5	58,1				9	216			
P24 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 1	80,85	79,00	79,15	78,77	90,5	436,5	68,6	62,98	5,2	8,3	8	192	184	13,9	7,5
P24 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 2	81,38	79,00	78,64		90,6	370,5	58,2				7	168			
P24 AN20-80 (B) 3,0 (8,0%) 3	81,50	79,00	78,52		90,4	395,0	62,1				8	192			
P24 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,69	79,00	78,34	78,00	90,7	303,0	47,6	44,38	2,8	6,3	7	168	168	0,0	0,0
P24 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 2	82,00	79,00	78,04		90,3	273,0	42,9				7	168			
P24 AN20-80 (B) 3,5 (7,5%) 3	82,44	79,00	77,63		90,0	271,0	42,6				7	168			
P24 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 1	81,00	79,00	79,01	78,68	90,5	360,0	56,6	54,86	2,7	4,9	5	120	120	0,0	0,0
P24 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 2	81,47	79,00	78,54		90,6	357,5	56,2				5	120			
P24 AN20-80 (B) 3,5 (8,0%) 3	81,53	79,00	78,49		90,8	329,5	51,8				-	-			
P24 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,17	79,00	78,84	78,14	90,7	328,5	51,6	40,90	9,3	22,7	4	96	144	0,0	0,0
P24 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 2	82,15	79,00	77,89		90,7	226,0	35,5				6	144			
P24 AN20-80 (B) 4,0 (7,5%) 3	82,36	79,00	77,70		90,4	226,0	35,5				6	144			
P24 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 1	81,63	79,00	78,40	78,38	90,7	338,0	53,1	49,54	3,9	7,8	5	120	120	0,0	0,0
P24 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 2	81,50	79,00	78,52		90,5	318,5	50,1				5	120			
P24 AN20-80 (B) 4,0 (8,0%) 3	81,80	79,00	78,23		90,6	289,0	45,4				5	120			
P24 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 1	81,46	80,00	79,55	79,47	90,6	398,5	62,6	60,31	2,1	3,4	5	120	132	17,0	12,9
P24 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,57	80,00	79,45		90,4	378,5	59,5				6	144			
P24 AN30-70 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,61	80,00	79,40		90,8	374,0	58,8				8	192			
P24 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 1	81,56	80,00	79,46	79,26	90,6	402,5	63,3	62,35	2,0	3,2	9	216	216	24,0	11,1
P24 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 2	81,67	80,00	79,34		90,6	405,5	63,7				8	192			
P24 AN30-70 (A) 3,0 (8,0%) 3	82,05	80,00	78,98		90,6	382,0	60,0				10	240			
P24 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,71	80,00	79,31	79,36	90,6	332,5	52,3	53,99	1,9	3,4	7	168	176	13,9	7,9
P24 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,40	80,00	79,61		90,5	356,0	56,0				8	192			
P24 AN30-70 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,87	80,00	79,15		90,6	342,0	53,8				7	168			
P24 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 1	81,62	80,00	79,40	79,39	90,7	348,0	54,7	54,65	1,2	2,2	8	192	216	24,0	11,1
P24 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 2	81,50	80,00	79,51		90,8	355,0	55,8				10	240			
P24 AN30-70 (A) 3,5 (8,0%) 3	81,75	80,00	79,27		90,7	340,0	53,4				9	216			
P24 AN30-70 (A) 4,0 (7,0%) 1	82,06	80,00	78,97	79,26	90,7	285,0	44,8	47,71	2,6	5,5	13	312	204	17,0	8,3
P24 AN30-70 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,62	80,00	79,40		90,7	308,5	48,5				8	192			
P24 AN30-70 (A) 4,0 (7,0%) 3	81,61	80,00	79,41		90,7	317,0	49,8				9	216			
P24 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,49	80,00	79,52	79,92	91,4	315,0	49,5	49,41	0,9	1,9	7	168	336	33,9	10,1
P24 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 2	80,97	80,00	80,03		90,6	308,0	48,4				13	312			
P24 AN30-70 (A) 4,0 (7,5%) 3	80,78	80,00	80,22		90,6	320,0	50,3				15	360			
P24 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,09	79,00	78,91	78,74	90,6	350,5	55,1	54,89	2,0	3,6	5	120	180	17,0	9,4
P24 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,15	79,00	78,86		90,0	361,0	56,7				8	192			
P24 AN30-70 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,57	79,00	78,45		90,3	336,0	52,8				7	168			
P24 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 1	80,37	79,00	79,62	79,30	90,7	419,0	65,9	61,88	4,0	6,5	5	120	120	0,0	0,0
P24 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 2	80,65	79,00	79,34		90,7	394,5	62,0				5	120			
P24 AN30-70 (B) 3,0 (8,0%) 3	81,06	79,00	78,94		90,4	367,5	57,8				5	120			
P24 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,23	79,00	78,78	78,78	90,5	338,0	53,1	52,74	1,3	2,5	5	120	136	13,9	10,2
P24 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,05	79,00	78,96		90,6	342,5	53,8				6	144			
P24 AN30-70 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,40	79,00	78,61		90,4	326,0	51,2				6	144			
P24 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 1	80,24	79,00	79,75	79,27	90,7	364,0	57,2	56,17	2,7	4,8	5	120	120	0,0	0,0
P24 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 2	81,35	79,00	78,67		90,7	338,0	53,1				5	120			
P24 AN30-70 (B) 3,5 (8,0%) 3	80,60	79,00	79,39		90,3	370,0	58,2				5	120			
P24 AN30-70 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,48	79,00	78,54	78,87	90,7	318,0	50,0	49,07	1,1	2,3	4	96	96	0,0	0,0
P24 AN30-70 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,04	79,00	78,97		90,9	314,5	49,4				5	120			
P24 AN30-70 (B) 4,0 (7,0%) 3	80,91	79,00	79,09		90,4	304,0	47,8				4	96			
P24 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,39	79,00	78,62	78,57	90,8	297,0	46,7	45,43	1,6	3,5	5	120	120	0,0	0,0
P24 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,49	79,00	78,53		90,9	277,5	43,6				5	120			
P24 AN30-70 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,46	79,00	78,56		90,4	292,5	46,0				5	120			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	lméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P16 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 1	82,12	80,00	78,91	79,25	91,2	383,0	60,2	59,60	1,3	2,1	17	408	440	27,7	6,3
P16 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 2	81,62	80,00	79,39		90,3	384,5	60,4				19	456			
P16 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 3	81,58	80,00	79,43		90,4	370,0	58,2				19	456			
P16 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 1	82,17	80,00	78,86	79,02	90,8	365,0	57,4	58,47	1,5	2,6	18	432	408	24,0	5,9
P16 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,94	80,00	79,09		90,6	368,0	57,8				17	408			
P16 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,90	80,00	79,13		90,6	383,0	60,2				16	384			
P16 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 1	81,46	80,00	79,55	79,26	90,7	354,5	55,7	54,57	2,7	5,0	13	312	324	17,0	5,2
P16 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 2	81,55	80,00	79,47		90,3	359,5	56,5				14	336			
P16 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 3	82,28	80,00	78,76		90,4	327,5	51,5				11	264			
P16 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 1	83,05	80,00	78,03	78,34	90,3	267,5	42,0	44,64	8,3	18,6	9	216	228	17,0	7,4
P16 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 2	83,28	80,00	77,81		90,4	241,5	38,0				10	240			
P16 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,84	80,00	79,18		90,5	343,0	53,9				14	336			
P16 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 1	81,68	80,00	79,33	79,18	90,5	323,0	50,8	49,17	2,0	4,0	14	336	328	13,9	4,2
P16 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 2	82,08	80,00	78,95		90,7	299,0	47,0				13	312			
P16 AB20-80 (A) 34,0 (7,0%) 3	81,77	80,00	79,25		90,3	316,5	49,8				14	336			
P16 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 1	82,07	80,00	78,96	79,03	90,5	304,5	47,9	49,20	1,2	2,4	8	192	228	50,9	22,3
P16 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 2	82,22	80,00	78,82		90,6	317,0	49,8				11	264			
P16 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,71	80,00	79,30		90,6	317,5	49,9				14	336			
P16 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 1	81,73	79,00	78,30	78,30	90,5	349,5	54,9	54,39	1,5	2,7	10	240	264	24,0	9,1
P16 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 2	81,62	79,00	78,40		90,4	353,0	55,5				12	288			
P16 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 3	81,83	79,00	78,20		90,0	335,5	52,7				11	264			
P16 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,48	79,00	78,54	78,55	90,2	354,5	55,7	57,48	2,0	3,5	8	192	252	17,0	6,7
P16 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,64	79,00	78,39		90,4	379,5	59,7				10	240			
P16 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,27	79,00	78,74		90,3	363,0	57,1				11	264			
P16 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 1	81,37	79,00	78,65	78,51	90,2	331,0	52,0	50,41	1,4	2,9	13	312	304	13,9	4,6
P16 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 2	81,66	79,00	78,37		90,4	313,5	49,3				12	288			
P16 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 3	81,49	79,00	78,53		90,4	317,5	49,9				13	312			
P16 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,44	79,00	78,57	78,63	90,5	346,5	54,5	54,44	0,7	1,4	7	168	228	17,0	7,4
P16 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,45	79,00	78,56		90,4	341,5	53,7				9	216			
P16 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,25	79,00	78,76		90,4	351,0	55,2				10	240			
P16 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,15	79,00	78,85	78,55	90,4	327,0	51,4	49,17	1,9	3,9	12	288	288	24,0	8,3
P16 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,62	79,00	78,40		90,5	307,0	48,3				13	312			
P16 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 3	81,63	79,00	78,39		90,4	304,5	47,9				11	264			
P16 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,15	79,00	78,85	78,79	90,7	315,0	49,5	51,17	1,4	2,8	9	216	240	33,9	14,1
P16 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,27	79,00	78,74		90,7	332,0	52,2				11	264			
P16 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,23	79,00	78,78		90,4	329,5	51,8				-	-			
P16 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 1	81,87	80,00	79,15	79,17	90,4	390,5	61,4	58,71	3,8	6,5	15	360	360	0,0	0,0
P16 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 2	81,98	80,00	79,05		90,4	384,5	60,4				15	360			
P16 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 3	81,70	80,00	79,32		90,6	345,5	54,3				15	360			
P16 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 1	82,08	80,00	78,95	79,18	90,5	378,0	59,4	59,23	0,7	1,2	12	288	312	24,0	7,7
P16 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,55	80,00	79,46		90,4	372,0	58,5				14	336			
P16 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,88	80,00	79,14		90,4	380,5	59,8				13	312			
P16 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 1	81,45	80,00	79,56	79,15	90,3	361,0	56,7	54,07	3,0	5,6	14	336	352	13,9	3,9
P16 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 2	81,85	80,00	79,17		90,4	348,0	54,7				15	360			
P16 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 3	82,32	80,00	78,72		90,3	323,0	50,8				15	360			
P16 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,42	80,00	79,59	79,40	90,7	366,0	57,5	56,30	1,1	1,9	16	384	344	36,7	10,7
P16 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,73	80,00	79,29		90,5	354,5	55,7				13	312			
P16 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,68	80,00	79,33		90,7	354,0	55,6				14	336			
P16 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 1	81,40	80,00	79,61	79,25	90,3	346,0	54,4	50,75	3,8	7,5	12	288	264	24,0	9,1
P16 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,89	80,00	79,14		90,4	325,0	51,1				10	240			
P16 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 3	82,01	80,00	79,01		90,1	297,5	46,8				11	264			
P16 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,84	80,00	79,18	79,19	90,5	302,0	47,5	48,36	0,8	1,7	12	288	296	13,9	4,7
P16 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 2	81,86	80,00	79,16		90,5	309,0	48,6				13	312			
P16 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,81	80,00	79,21		90,5	312,0	49,0				12	288			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	Iméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P16 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 1	81,24	79,00	78,77	78,74	90,7	383,0	60,2	58,63	1,4	2,4	14	336	344	13,9	4,0
P16 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 2	81,27	79,00	78,74		90,3	369,5	58,1				14	336			
P16 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 3	81,29	79,00	78,72		90,6	366,5	57,6				15	360			
P16 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,71	79,00	78,31	78,53	90,9	386,5	60,8	59,97	2,2	3,6	7	168	264	33,9	12,9
P16 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,20	79,00	78,81		90,7	392,0	61,6				12	288			
P16 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,56	79,00	78,46		90,3	366,0	57,5				10	240			
P16 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 1	81,33	79,00	78,68	78,56	90,3	336,5	52,9	51,98	1,3	2,4	7	168	264	0,0	0,0
P16 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 2	81,27	79,00	78,74		90,2	334,0	52,5				11	264			
P16 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 3	81,77	79,00	78,26		90,4	321,5	50,5				11	264			
P16 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,62	79,00	78,40	78,45	90,5	347,0	54,5	53,29	2,2	4,2	11	264	272	13,9	5,1
P16 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,55	79,00	78,47		90,5	322,5	50,7				11	264			
P16 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,55	79,00	78,47		90,4	347,5	54,6				12	288			
P16 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,26	79,00	78,75	78,53	90,4	306,0	48,1	45,85	2,2	4,7	6	144	156	17,0	10,9
P16 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,84	79,00	78,19		90,3	278,5	43,8				7	168			
P16 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 3	81,35	79,00	78,66		90,3	290,5	45,7				8	192			
P16 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,24	79,00	78,77	78,83	90,7	342,0	53,8	52,48	1,2	2,3	7	168	176	13,9	7,9
P16 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,43	79,00	78,59		90,4	327,0	51,4				8	192			
P16 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 3	80,85	79,00	79,15		90,6	332,5	52,3				7	168			
P20 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 1	81,65	80,00	79,37	79,27	90,4	396,0	62,2	59,97	2,1	3,6	13	312	320	13,9	4,3
P20 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 2	81,67	80,00	79,34		90,4	379,5	59,7				14	336			
P20 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 3	81,94	80,00	79,09		90,5	369,0	58,0				13	312			
P20 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 1	81,95	80,00	79,08	79,14	90,5	384,5	60,4	58,16	2,2	3,9	14	336	352	27,7	7,9
P20 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,81	80,00	79,21		90,4	356,0	56,0				14	336			
P20 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,89	80,00	79,14		90,6	369,5	58,1				16	384			
P20 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 1	82,81	80,00	78,25	78,50	90,2	195,5	30,7	36,60	11,4	31,2	11	264	286	33,9	11,9
P20 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 2	83,12	80,00	77,96		90,2	186,5	29,3				13	312			
P20 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 3	81,74	80,00	79,28		90,4	316,5	49,8				17	408			
P20 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,86	80,00	79,16	79,10	90,7	351,5	55,3	54,75	0,5	0,9	9	216	288	33,9	11,8
P20 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,96	80,00	79,07		90,5	345,0	54,2				11	264			
P20 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,95	80,00	79,08		90,5	348,5	54,8				13	312			
P20 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 1	81,58	80,00	79,43	79,36	90,4	346,5	54,5	53,60	1,2	2,3	10	240	248	13,9	5,6
P20 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,73	80,00	79,29		90,4	335,5	52,7				10	240			
P20 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 3	83,22	80,00	77,87		90,3	160,5	25,2				11	264			
P20 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 1	82,43	80,00	78,62	78,73	90,4	275,0	43,2	46,06	5,2	11,2	11	264	248	27,7	11,2
P20 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 2	82,76	80,00	78,30		90,3	273,0	42,9				9	216			
P20 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,75	80,00	79,27		90,4	331,0	52,0				11	264			
P20 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 1	81,27	79,00	78,74	78,59	90,6	350,5	55,1	55,02	0,1	0,2	11	264	280	27,7	9,9
P20 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 2	81,58	79,00	78,44		90,3	349,5	54,9				11	264			
P20 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 3	83,90	79,00	76,27		90,3	147,0	23,1				13	312			
P20 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 1	83,09	79,00	77,01	77,50	90,2	322,0	50,6	46,10	6,4	13,9	8	192	224	36,7	16,4
P20 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,90	79,00	78,13		90,3	264,5	41,6				9	216			
P20 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 3	82,73	79,00	77,35		90,3	206,5	32,5				11	264			
P20 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 1	81,12	79,00	78,88	78,76	90,5	342,5	53,8	53,81	1,9	3,6	11	264	272	13,9	5,1
P20 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 2	81,33	79,00	78,68		90,4	330,0	51,9				11	264			
P20 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 3	81,29	79,00	78,72		90,4	354,5	55,7				12	288			
P20 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,75	79,00	78,28	78,29	90,4	331,0	52,0	51,40	3,6	7,0	8	192	252	17,0	6,7
P20 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,93	79,00	78,11		90,4	302,5	47,5				10	240			
P20 AAB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,53	79,00	78,49		90,3	347,5	54,6				11	264			
P20 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,07	79,00	78,93	78,79	90,3	317,5	49,9	48,86	0,9	1,9	8	192	192	0,0	0,0
P20 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,25	79,00	78,76		90,4	306,0	48,1				8	192			
P20 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 3	81,34	79,00	78,67		90,7	309,0	48,6				10	240			
P20 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,32	79,00	78,69	78,82	90,6	330,5	52,0	49,83	2,7	5,5	8	192	252	17,0	6,7
P20 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,00	79,00	79,00		90,4	323,0	50,8				11	264			
P20 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,24	79,00	78,77		90,6	297,5	46,8				10	240			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	lméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P20 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 1	82,54	80,00	78,51	78,70	90,2	231,0	36,3	32,93	4,8	14,5	12	288	360	33,9	9,4
P20 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 2	83,16	80,00	77,93		90,3	188,0	29,6				14	336			
P20 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 3	81,33	80,00	79,68		90,4	362,5	57,0				16	384			
P20 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 1	82,58	80,00	78,47	78,51	90,3	347,5	54,6	50,25	3,8	7,6	18	432	432	0,0	0,0
P20 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 2	82,59	80,00	78,46		90,4	308,5	48,5				18	432			
P20 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 3	82,45	80,00	78,59		90,3	303,0	47,6				18	432			
P20 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 1	81,86	80,00	79,16	79,27	90,5	366,0	57,5	56,75	1,6	2,9	10	240	312	0,0	0,0
P20 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 2	81,61	80,00	79,41		90,6	349,0	54,9				13	312			
P20 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 3	81,77	80,00	79,25		90,6	368,0	57,8				13	312			
P20 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 1	82,50	80,00	78,55	78,56	90,6	305,0	47,9	45,87	2,2	4,7	22	528	552	41,6	7,5
P20 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 2	82,68	80,00	78,37		90,4	277,5	43,6				22	528			
P20 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 3	82,27	80,00	78,77		90,4	293,0	46,1				25	600			
P20 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 1	82,26	80,00	78,78	79,12	90,3	300,5	47,2	51,05	5,4	10,7	11	264	280	27,7	9,9
P20 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,99	80,00	79,04		90,3	252,5	39,7				11	264			
P20 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 3	81,46	80,00	79,55		90,4	349,0	54,9				13	312			
P20 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,74	80,00	79,28	79,57	90,7	326,0	51,2	49,88	3,8	7,6	23	552	608	60,4	9,9
P20 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 2	80,84	80,00	80,16		90,9	336,0	52,8				25	600			
P20 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,74	80,00	79,28		90,6	290,0	45,6				28	672			
P20 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 1	81,26	79,00	78,75	78,56	90,6	373,5	58,7	57,11	1,4	2,4	11	264	264	0,0	0,0
P20 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 2	81,77	79,00	78,26		90,3	358,0	56,3				11	264			
P20 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 3	81,35	79,00	78,66		90,3	358,5	56,4				16	384			
P20 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,21	79,00	78,80	78,60	90,9	396,0	62,2	58,34	3,6	6,3	12	288	264	24,0	9,1
P20 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,53	79,00	78,49		90,6	367,5	57,8				10	240			
P20 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,50	79,00	78,52		90,6	350,0	55,0				11	264			
P20 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 1	82,17	79,00	77,88	78,26	90,4	270,0	42,4	47,94	4,8	10,0	12	288	192	0,0	0,0
P20 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 2	81,62	79,00	78,40		90,3	324,5	51,0				8	192			
P20 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 3	81,51	79,00	78,51		90,5	320,5	50,4				8	192			
P20 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,59	79,00	78,43	78,57	90,5	364,0	57,2	56,75	0,7	1,2	12	288	288	0,0	0,0
P20 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,22	79,00	78,79		90,5	356,0	56,0				12	288			
P20 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,52	79,00	78,50		90,5	363,0	57,1				12	288			
P20 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,81	79,00	78,22	78,11	90,3	280,5	44,1	41,93	3,1	7,3	10	240	240	0,0	0,0
P20 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,82	79,00	78,21		90,4	253,0	39,8				10	240			
P20 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 3	82,14	79,00	77,90		90,1	211,5	33,2				10	240			
P20 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 1	82,31	79,00	77,75	78,13	90,5	302,0	47,5	49,46	2,0	4,0	9	216	240	24,0	10,0
P20 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,73	79,00	78,30		90,7	327,0	51,4				10	240			
P20 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,68	79,00	78,34		90,6	315,0	49,5				11	264			
P24 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 1	81,74	80,00	79,28	79,35	90,6	402,5	63,3	63,85	0,7	1,1	12	288	320	27,7	8,7
P24 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 2	81,58	80,00	79,44		90,4	405,0	63,7				14	336			
P24 AB20-80 (A) 3,0 (7,0%) 3	81,68	80,00	79,33		90,5	411,0	64,6				14	336			
P24 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 1	81,50	80,00	79,51	79,31	90,8	353,5	55,6	58,27	2,7	4,6	16	384	384	0,0	0,0
P24 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,87	80,00	79,15		90,6	387,5	60,9				16	384			
P24 AB20-80 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,76	80,00	79,26		90,5	371,0	58,3				20	480			
P24 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 1	81,66	80,00	79,36	79,33	90,4	361,0	56,7	57,40	0,6	1,0	12	288	288	0,0	0,0
P24 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 2	81,84	80,00	79,18		90,6	367,0	57,7				12	288			
P24 AB20-80 (A) 3,5 (7,0%) 3	81,57	80,00	79,45		90,7	367,5	57,8				12	288			
P24 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,08	80,00	79,92	79,82	90,7	322,0	50,6	53,26	4,2	7,9	18	432	576	67,9	11,8
P24 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 2	80,88	80,00	80,12		90,8	369,5	58,1				26	624			
P24 AB20-80 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,60	80,00	79,41		90,6	325,0	51,1				22	528			
P24 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 1	81,57	80,00	79,44	79,47	90,4	356,5	56,0	55,15	1,1	2,0	9	216	240	24,0	10,0
P24 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,50	80,00	79,51		90,7	343,0	53,9				10	240			
P24 AB20-80 (A) 4,0 (7,0%) 3	81,56	80,00	79,46		90,4	353,0	55,5				11	264			
P24 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,60	80,00	79,42	79,12	90,9	331,5	52,1	47,39	4,8	10,2	8	192	300	17,0	5,7
P24 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 2	82,30	80,00	78,74		90,4	270,0	42,4				12	288			
P24 AB20-80 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,82	80,00	79,20		90,6	303,0	47,6				13	312			

CP	hméd. (mm)	%sol. Teórico	%sol. Real	%sol. Méd.	lméd. (mm)	Carga (KN)	Resistência (MPa)	Resist. Méd. (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	E	E (J)	E Méd. (J)	Sd (J)	CV (%)
P24 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 1	81,24	79,00	78,77	78,61	90,4	391,5	61,5	58,82	3,3	5,7	8	192	276	17,0	6,1
P24 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 2	81,49	79,00	78,53		90,4	350,5	55,1				12	288			
P24 AB20-80 (B) 3,0 (7,0%) 3	81,50	79,00	78,52		90,2	380,5	59,8				11	264			
P24 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 1	80,79	79,00	79,21	78,81	90,3	417,5	65,6	62,48	2,7	4,4	12	288	296	13,9	4,7
P24 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,34	79,00	78,67		90,7	389,0	61,1				13	312			
P24 AB20-80 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,46	79,00	78,55		90,6	386,0	60,7				12	288			
P24 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 1	80,98	79,00	79,03	78,95	90,6	366,5	57,6	56,90	0,6	1,1	7	168	168	0,0	0,0
P24 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 2	81,09	79,00	78,92		90,6	359,0	56,4				7	168			
P24 AB20-80 (B) 3,5 (7,0%) 3	81,09	79,00	78,92		90,6	360,5	56,7				7	168			
P24 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,53	79,00	78,49	78,30	90,8	356,0	56,0	55,75	0,7	1,3	7	168	160	13,9	8,7
P24 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,80	79,00	78,23		90,5	358,5	56,4				7	168			
P24 AB20-80 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,86	79,00	78,18		90,6	349,5	54,9				6	144			
P24 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 1	80,97	79,00	79,03	78,91	90,2	342,0	53,8	53,08	0,6	1,2	8	192	192	0,0	0,0
P24 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,10	79,00	78,90		90,6	334,5	52,6				8	192			
P24 AB20-80 (B) 4,0 (7,0%) 3	81,23	79,00	78,78		90,4	336,5	52,9				10	240			
P24 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,52	79,00	78,50	78,64	90,7	327,5	51,5	51,69	0,7	1,4	8	192	192	0,0	0,0
P24 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,23	79,00	78,78		90,6	325,0	51,1				8	192			
P24 AB20-80 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,36	79,00	78,66		90,7	334,0	52,5				8	192			
P24 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 1	81,79	80,00	79,23	79,42	90,5	400,0	62,9	64,19	2,1	3,3	9	216	288	0,0	0,0
P24 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 2	81,77	80,00	79,25		90,6	401,0	63,0				12	288			
P24 AB30-70 (A) 3,0 (7,0%) 3	81,22	80,00	79,79		90,6	424,0	66,6				12	288			
P24 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 1	81,34	80,00	79,67	79,63	90,9	310,5	48,8	50,48	3,9	7,7	não fechou	720	-	0,0	0,0
P24 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 2	81,38	80,00	79,63		91,0	303,5	47,7				não fechou	720			
P24 AB30-70 (A) 3,0 (7,5%) 3	81,41	80,00	79,60		91,1	349,5	54,9				não fechou	720			
P24 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 1	81,43	80,00	79,58	79,45	90,4	399,0	62,7	58,66	3,7	6,3	12	288	272	13,9	5,1
P24 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 2	81,90	80,00	79,12		90,5	353,5	55,6				11	264			
P24 AB30-70 (A) 3,5 (7,0%) 3	81,36	80,00	79,65		90,4	367,0	57,7				11	264			
P24 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 1	81,67	80,00	79,34	79,36	90,6	360,5	56,7	55,96	0,9	1,5	8	192	192	0,0	0,0
P24 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 2	81,56	80,00	79,46		90,8	357,5	56,2				8	192			
P24 AB30-70 (A) 3,5 (7,5%) 3	81,74	80,00	79,28		90,6	350,0	55,0				8	192			
P24 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 1	81,59	80,00	79,43	79,63	90,6	373,5	58,7	56,85	2,5	4,4	11	264	272	13,9	5,1
P24 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 2	81,20	80,00	79,81		90,6	368,0	57,8				11	264			
P24 AB30-70 (A) 4,0 (7,0%) 3	81,36	80,00	79,65		90,7	343,5	54,0				12	288			
P24 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 1	81,34	80,00	79,67	79,72	91,0	334,5	52,6	50,96	1,4	2,8	9	216	408	0,0	0,0
P24 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 2	81,20	80,00	79,81		91,1	319,5	50,2				17	408			
P24 AB30-70 (A) 4,0 (7,5%) 3	81,32	80,00	79,69		90,7	318,5	50,1				17	408			
P24 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 1	80,86	79,00	79,14	78,73	90,5	406,5	63,9	59,47	4,2	7,1	9	216	232	13,9	6,0
P24 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 2	81,38	79,00	78,63		90,4	375,5	59,0				10	240			
P24 AB30-70 (B) 3,0 (7,0%) 3	81,59	79,00	78,43		90,4	353,0	55,5				10	240			
P24 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 1	81,50	79,00	78,52	78,68	90,8	406,0	63,8	64,53	1,7	2,7	10	240	240	0,0	0,0
P24 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 2	81,12	79,00	78,89		90,9	423,0	66,5				10	240			
P24 AB30-70 (B) 3,0 (7,5%) 3	81,37	79,00	78,65		90,6	402,5	63,3				10	240			
P24 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 1	81,18	79,00	78,83	78,77	90,5	377,5	59,3	55,44	3,4	6,1	7	168	184	13,9	7,5
P24 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 2	81,07	79,00	78,94		90,3	342,5	53,8				8	192			
P24 AB30-70 (B) 3,5 (7,0%) 3	81,46	79,00	78,55		90,3	338,0	53,1				8	192			
P24 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 1	81,14	79,00	78,87	78,90	90,7	364,5	57,3	57,74	0,4	0,7	6	144	156	17,0	10,9
P24 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 2	81,10	79,00	78,90		90,7	369,0	58,0				7	168			
P24 AB30-70 (B) 3,5 (7,5%) 3	81,06	79,00	78,94		90,8	368,5	57,9				8	192			
P24 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 1	81,10	79,00	78,91	78,87	90,8	345,0	54,2	52,24	1,9	3,6	7	168	168	0,0	0,0
P24 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 2	81,04	79,00	78,97		90,9	321,5	50,5				7	168			
P24 AB30-70 (B) 4,0 (7,0%) 3	81,27	79,00	78,74		90,5	330,5	52,0				7	168			
P24 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 1	81,14	79,00	78,87	78,79	91,0	297,5	46,8	46,82	2,6	5,5	7	168	160	13,9	8,7
P24 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 2	81,47	79,00	78,55		90,9	314,5	49,4				7	168			
P24 AB30-70 (B) 4,0 (7,5%) 3	81,05	79,00	78,95		90,6	281,5	44,2				6	144			

ANEXO III

Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova 9x8cm da 2ª etapa do programa experimental.

Tabela A14: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 1.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M1 1	4.175	76,04	2,29	61,2
M1 2	4.295	77,86	2,30	67,5
M1 3	4.250	76,96	2,31	63,7
M1 4	4.305	76,55	2,35	66,6
M1 5	4.450	77,06	2,41	72,7
M1 6	4.060	76,94	2,20	49,8
M1 7	4.455	78,68	2,36	71,4
M1 8	4.295	77,47	2,31	68,6
M1 9	4.190	76,44	2,29	63,1
M1 10	4.280	76,79	2,33	67,9
M1 11	4.530	78,29	2,42	77,9
M1 12	4.560	79,40	2,40	75,9
Resistência média (Mpa)		67,2		
Desvio padrão		7,4		
C.V. (%)		11,1		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M1 2,30 (1)	1.160	80,62	2,29	53,7
M1 2,30 (2)	1.160	80,85	2,28	53,6
M1 2,35 (1)	1.185	81,18	2,32	63,3
M1 2,35 (2)	1.185	81,36	2,32	60,8

Tabela A15: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 2.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M2 1	4.125	76,16	2,26	50,5
M2 2	4.570	78,52	2,43	75,2
M2 3	4.265	76,96	2,31	58,6
M2 4	4.390	78,22	2,34	68,3
M2 5	4.540	79,63	2,38	73,9
M2 6	4.500	79,21	2,37	69,9
M2 7	4.360	77,22	2,36	63,7
M2 8	4.590	79,55	2,41	70,3
M2 9	4.130	76,51	2,25	48,6
M2 10	4.480	78,26	2,39	68,5
M2 11	4.360	77,72	2,34	61,4
M2 12	4.310	76,66	2,35	70,4
M2 13	4.475	78,61	2,38	71,4
Resistência média (Mpa)		65,4		
Desvio padrão		8,5		
C.V. (%)		13,0		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M2 2,30 (1)	1.160	80,92	2,28	52,2
M2 2,30 (2)	1.160	80,80	2,28	47,0
M2 2,35 (1)	1.185	81,06	2,33	60,5
M2 2,35 (2)	1.180	80,85	2,32	52,4

Tabela A16: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 3.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M3 1	4.680	78,94	2,47	69,0
M3 2	4.565	78,28	2,43	67,9
M3 3	4.150	76,95	2,25	46,9
M3 4	4.395	78,39	2,34	59,5
M3 5	4.445	78,08	2,38	61,1
M3 6	4.520	78,92	2,39	65,4
M3 7	4.390	77,78	2,36	63,1
M3 8	4.415	77,65	2,37	63,4
M3 9	4.705	79,42	2,47	69,4
M3 10	4.590	79,15	2,42	66,1
Resistência média (Mpa)		63,2		
Desvio padrão		6,6		
C.V. (%)		10,4		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M3 2,30 (1)	1.160	80,78	2,29	51,7
M3 2,30 (2)	1.160	80,50	2,29	51,1
M3 2,35 (1)	1.185	80,95	2,33	60,1
M3 2,35 (2)	1.185	81,15	2,32	58,2

Tabela A17: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 4.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm³)	Resistência (MPa)
M4 1	4.585	78,84	2,43	61,4
M4 2	4.520	78,81	2,39	63,3
M4 3	4.385	77,21	2,37	60,2
M4 4	4.140	75,90	2,28	53,0
M4 5	4.105	75,29	2,28	53,1
M4 6	4.245	76,30	2,32	58,0
M4 7	4.495	78,31	2,40	62,1
M4 8	4.340	75,52	2,40	59,5
M4 9	4.585	78,92	2,42	62,7
M4 10	4.585	78,18	2,45	61,2
Resistência média (Mpa)		59,4		
Desvio padrão		3,7		
C.V. (%)		6,3		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm³)	Resistência (MPa)
M4 2,30 (1)	1.160	79,87	2,31	57,3
M4 2,30 (2)	1.160	80,30	2,30	57,7
M4 2,35 (1)	1.185	80,94	2,33	62,5
M4 2,35 (2)	1.180	80,37	2,34	60,8

Tabela A18: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura 5.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M5 1	4.370	77,78	2,35	59,5
M5 2	4.455	78,38	2,37	64,7
M5 3	4.400	78,35	2,34	56,5
M5 4	4.485	77,98	2,40	65,8
M5 5	4.355	78,12	2,33	56,0
M5 6	4.380	77,85	2,35	57,8
M5 7	4.370	77,88	2,34	56,2
M5 8	4.335	77,68	2,33	55,2
M5 9	4.480	77,56	2,41	65,2
M5 10	4.360	77,67	2,34	59,9
M5 11	4.500	77,98	2,41	65,7
M5 12	4.550	78,93	2,41	68,1
Resistência média (Mpa)		60,9		
Desvio padrão		4,7		
C.V. (%)		7,7		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M5 2,30 (1)	1.160	80,92	2,28	44,4
M5 2,30 (2)	1.160	80,90	2,28	39,5
M5 2,35 (1)	1.185	80,65	2,34	51,5
M5 2,35 (2)	1.185	81,04	2,33	49,6

Tabela A19: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura lavada 4.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M4 lav. 1	4.720	80,55	2,45	57,3
M4 lav. 2	4.710	78,86	2,49	60,1
M4 lav. 3	4.690	79,64	2,46	51,6
M4 lav. 4	4.775	79,68	2,50	65,9
M4 lav. 5	4.700	78,78	2,49	56,4
M4 lav. 6	4.570	77,60	2,46	58,1
M4 lav. 7	4.650	78,07	2,49	60,0
M4 lav. 8	4.700	80,17	2,45	57,8
M4 lav. 9	4.640	79,16	2,45	58,6
M4 lav. 10	4.525	77,43	2,44	63,1
M4 lav. 11	4.530	77,06	2,45	64,5
M4 lav. 12	4.630	79,34	2,44	61,1
M4 lav. 13	4.535	78,42	2,41	61,6
M4 lav. 14	4.625	79,17	2,44	63,3
M4 lav. 15	4.555	78,23	2,43	55,5
M4 lav. 16	4.415	77,66	2,37	61,5
Resistência média (Mpa)		59,8		
Desvio padrão		3,7		
C.V. (%)		6,2		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm3)	Resistência (MPa)
M4 lav. 2,30 (1)	1.160	81,36	2,27	43,1
M4 lav. 2,30 (2)	1.160	81,69	2,26	37,6
M4 lav. 2,35 (1)	1.184	81,16	2,32	53,8
M4 lav. 2,35 (2)	1.182	81,52	2,31	52,0

Tabela A20: Valores de resistência à compressão das PCP e dos corpos-de-prova com a mistura lavada 5.

Peças	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm ³)	Resistência (MPa)
M5 lav. 1	4.715	80,12	2,46	62,6
M5 lav.2	4.470	79,63	2,34	60,9
M5 lav. 3	4.600	78,27	2,45	64,4
M5 lav. 4	4.670	78,83	2,47	61,1
M5 lav. 5	4.385	78,13	2,34	54,5
M5 lav. 6	4.485	77,97	2,40	49,8
M5 lav. 7	4.520	78,28	2,41	63,8
M5 lav. 8	4.620	79,22	2,43	56,7
M5 lav. 9	4.720	79,27	2,49	59,0
M5 lav. 10	4.665	78,63	2,48	63,3
M5 lav. 11	4.560	79,06	2,41	64,4
M5 lav. 12	4.555	78,38	2,43	65,4
M5 lav. 13	4.590	78,96	2,43	57,6
M5 lav. 14	4.445	78,73	2,36	58,8
Resistência média (Mpa)		60,2		
Desvio padrão		4,4		
C.V. (%)		7,4		
CPs	Massa (g)	hméd. (mm)	d (g/cm ³)	Resistência (MPa)
M5 lav. 2,30 (1)	1.160	81,72	2,26	34,1
M5 lav. 2,30 (2)	1.159	81,68	2,26	36,9
M5 lav. 2,35 (1)	1.185	82,06	2,30	33,8
M5 lav. 2,35 (2)	1.184	82,05	2,30	43,1

ANEXO IV

PROCEDIMENTO DE CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DO
TEOR DE SÓLIDOS E DO TEOR DE SÓLIDOS + ÁGUA PARA AS PCP

Nas PCP, o volume de concreto da peça é constituído por material sólido (cimento e agregados) e por vazios de ar e água existentes dentro do concreto.

Considerando-se este fato, entende-se que o volume de sólidos de uma PCP é:

$$\%V_{sol} = \frac{V_{sol}}{V_{concreto}} \times 100$$

(A1)

Onde:

$\%V_{sol}$ = % de volume de material sólido da mistura;

V_{sol} = volume de material sólido referente ao cimento e agregados – não se leva em consideração a água;

$V_{concreto}$ = volume de concreto;

Conhecendo-se a massa de cada material que vai numa betoneira de mistura, é possível através de uma regra de três, determinar o massa de cada material numa PCP, pois é conhecida a massa total de cada peça.

Em seguida, tendo a massa dos materiais secos de cada peça e a massa específica dos mesmos é possível determinar o volume de cada material:

$$V_{material} = \frac{m}{d}$$

(A2)

Onde:

$V_{material}$ = volume de cada material constituinte do concreto;

d = massa específica de cada um dos materiais.

m = massa de cada material empregado em uma PCP.

Somando-se este volume de cada material seco que constitui a PCP tem-se a $\%V_{sol}$.

Para determinar a $\%V_{sol}+água$, basta adicionar ao valor encontrado anteriormente a quantidade de água empregada na mistura de acordo com a umidade.

A seguir, para um melhor entendimento do procedimento acima descrito, segue um exemplo de cálculo:

- Mistura 1 (Ponto M1 5 do anexo III)

Dados:

Massa específica do cimento: 2,98Kg/dm³

Massa específica do pedrisco: 2,652Kg/dm³

Massa específica da areia natural média: 2,612Kg/dm³

Massa específica da areia natural fina: 2,645Kg/dm³

Peso da peça = 4,45Kg

Área da peça = 23,95747mm²

Altura da peça = 77,06mm

Volume da peça = (23,95747*77,06)/1.000 = 1,846162cm³

Traço:

Cimento = 200kg

Pedrisco= 144kg

Areia natural média = 364kg

Areia natural fina= 91kg

Umidade = 7,4%

Total de material em uma betoneira = 858,7247Kg

Através da regra de 3 sabe-se que numa peça tem-se:

Cimento = 1,0364Kg

Pedrisco= 0,7462Kg

Areia natural média = 1,8888Kg

Areia natural fina= 0,4719Kg

Utiliza-se a fórmula da expressão A2 para o cálculo do volume dos materiais:

$$V_{material} = \frac{m}{d} = 1,0364/2,98 = 0,347792$$

E assim faz-se sucessivamente com cada material.

O % volume de sólidos será encontrado empregando-se a fórmula A1:

$$\%V_{sol} = \frac{V_{sol}}{V_{concreto}} \times 100 = (1,5307/1,846162) \times 100 = 82,91\%$$

Finalmente, o % volume de sólidos+ água é encontrado adicionando-se a quantidade de água presente na mistura:

$$\%V_{sol+água} = \frac{V_{sol+água}}{V_{concreto}} \times 100 = (1,837338/1,846162) \times 100 = 99,52\%$$